



**Universidade de  
Aveiro  
2014**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Rafael José Silva  
Teixeira**

**Cinética e modelação da secagem convectiva de  
papel obtido a partir de fibras de algodão**



Universidade de Aveiro 2014

Departamento de Engenharia Mecânica



**Universidade de  
Aveiro  
2014**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Rafael José Silva  
Teixeira**

**Cinética e modelação da secagem convectiva de papel  
obtido a partir de fibras de algodão**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e amigos pelo apoio que deram.



**o júri**

**presidente**

**Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro

**arguente**

**Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Ambiente e Ordenamento, da Universidade de Aveiro

**orientador**

**Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Agradeço ao professor Doutor Fernando José Neto da Silva, pela disponibilidade e partilha de conhecimentos.



## **palavras-chave**

Secagem forçada, papel, de fibra de algodão, cinética de secagem, modelo de difusivo de Fick.

## **resumo**

No presente trabalho pretende-se caraterizar a cinética de secagem de papel obtido partir de fibra de algodão.

A componente experimental é executada com recurso a uma estação de secagem, munida com equipamentos de controlo e de leitura.

O objetivo é realizar a análise da cinética de secagem, com base nas condições impostas através dos parâmetros de entrada, temperatura a humidade relativa e velocidade do ar de secagem.

Os resultados permitem determinar a influência dos parâmetros temperatura, humidade relativa, velocidade do escoamento e espessura do material sobre a cinética de secagem.

Foi determinada a difusividade em cada ensaio e desenvolvido e validado um modelo matemático de secagem, com recurso aos valores obtidos experimentalmente.

A modelação da secagem é realizada através de um modelo que recorre à segunda lei de Fick. São apresentados os resultados da modelação e respetivos desvio padrão relativamente aos valores experimentais.



**keywords**

Forced drying, paper from cotton fiber, drying kinetics, drying modelling resorting to Fick's second law.

**abstract**

The present work aims at, the determination of paper obtained from cotton fiber drying kinetics.

The experimental component is performed using a drying station, equipped with control and reading equipment.

The goal is to perform the drying kinetics analysis based on the conditions imposed by the input parameters, temperature, relative humidity and velocity of the drying fluid.

The obtained results highlight the influence of the input.

The paper diffusivity was determined for each test.

A mathematical model of drying based upon Fick's second law of diffusion was developed and validated with values obtained experimentally.

The results of modeling and respective standard deviation from the experiment values are presented.







## Índice

Capítulo1 .....	1
1.1    Introdução.....	1
Capítulo2 .....	3
2.1    Estado de arte .....	3
2.2    Transferência de massa .....	3
2.3    Difusão.....	4
2.4    Principais equipamentos de secagem .....	4
2.5    Modelação .....	8
Capítulo3 .....	9
3.1    Método e procedimento experimental .....	9
3.2    Estação de secagem .....	9
3.3    Determinação da massa instantânea da amostra .....	10
3.4    Controlo da instalação .....	11
3.5    Amostra de papel .....	11
3.6    Determinação do teor de água da amostra. ....	13
3.7    Taxa de secagem .....	13
3.8    Planeamento experimental.....	13
3.9    Procedimento experimental .....	14
Capítulo 4 .....	15
4.1    Resultados .....	15
4.2    Condições impostas no interior da estação de secagem.....	15
4.3    Cinética de secagem.....	16
4.4    Efeito da temperatura na secagem .....	17
4.5    Efeito da Humidade Relativa de secagem .....	18
4.6    Efeito da velocidade do ar na secagem .....	18
4.7    Efeito da espessura .....	19
4.8    Taxa de secagem .....	19
Capítulo 5 .....	21
5.1    Modelação do processo de secagem .....	21
5.2    Determinação do coeficiente de transferência de massa na superfície do papel.....	21
5.3    Determinação da difusidade.....	23
5.4    Desvio relativo médio.....	25
5.5    Variação do teor de água com a espessura .....	26



Capítulo 6 .....	27
6.1    Conclusões .....	27
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>28</b>
Anexos .....	29

**Índice de figuras**

Figura 2.1 Desenvolvimento da camada-limite ( Incropera et al., data).....	3
Figura 2.2 Secagem por vácuo (C. M. van 't Land) .....	5
Figura 2.3 Secador leito fluidizado (C. M. van 't Land).....	5
Figura 2.4 Secadores Fluid-bed(C. M. van 't Land) .....	6
Figura 2.5 Secador contínuo rotativo de aquecimento direto (C. M. van 't Land) .....	6
Figura 2.6 Modo de funcionamento do secador rotativo (C. M. van 't Land).....	7
Figura 2.7 Secador (C. M. van 't Land).....	8
Figura 3.1 Estação de secagem. ....	9
Figura 3.2 Esquema da estação de secagem.....	10
Figura 3.3 Célula de carga .....	10
Figura 3.4 Computador da instalação .....	11
Figura 3.5 Papel fino de cor (0.24) (em bruto).....	11
Figura 3.6 (papel branco (0.94mm) – papel de cor riscado (0.94mm).....	12
Figura 4.1 Temperatura no interior da estação de secagem (objetivo de 40°C) .....	15
Figura 4.2 Humidade relativa no interior da estação de secagem (objetivo de 40%) .....	16
Figura 4.3 Velocidade no interior da estação de secagem (objetivo de 1.5m/s).....	16
Figura 4.4 Variação da massa de água no interior da amostra (1º Papel branco) .....	17
Figura 4.5 Efeito da temperatura na secagem do papel de cor espesso .....	17
Figura 4.6 Efeito da humidade relativa na secagem do papel de cor espesso .....	18
Figura 4.7 Efeito da velocidade do ar na secagem do papel branco.....	18
Figura 4.8 Efeito da espessura do papel na secagem .....	19
Figura 5.1 Posicionalmente das folhas no escoamento de ar.....	21
Figura 5.2 Esquema representativo da transferência de massa. ....	22
Figura 5.3 Modelo (Papel branco).....	23
Figura 5.4 Modelo (Papel de cor espesso) .....	24
Figura 5.5 Modelo (Papel de cor fino).....	24
Figura 5.6 Variação do teor de água ao longo da espessura de papal.....	26

**Nomenclatura** $N_A$  – Molar da espécie ( $\text{kmol}/(\text{s.m}^2)$ ) $C_{a,s}$  – concentração molar na superfície ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ) $C_{a,\infty}$  – concentração molar na corrente de ar ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ) $\bar{h}_u$  – coeficiente de transferência de massa médio ( $\text{m}/\text{s}$ ) $\overline{Sh}_e$  – número de Sherwood[-] $l$  – metade da espessura do papel (m) $D_{AB}$  – difusividade da água no ar ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $Re_l$  – número de *Reynolds*[-] $Sc$  – número de *Schmidt*[-] $F$  – taxa de transferência por unidade de área ( $\text{kmol}/(\text{s.m}^2)$ ) $C$  – concentração mássica de água [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] $X_{bu}$  – teor de água em base húmida(%) $m$  – massa (Kg) $L$  – espessura da folha de papel (m) $x$  – coordenadas onde está ocorrer transferência de massa(m) $u_\infty$  – velocidade do escoamento de ar ( $\text{m}/\text{s}$ ) $\vartheta$  – viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $t$  – tempo(s) $D$  – difusividade ( $\text{m}^2/\text{s}$ )



# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

O processo de secagem surge como um procedimento fundamental na indústria, estando associado a diversos processos de fabrico e visa a redução do teor de água presente no interior de um sólido.

Na indústria alimentar recorre-se frequentemente à secagem, devido à necessidade de conservar os alimentos por mais tempo e em boas condições. Também na indústria do papel o processo de secagem tem uma função determinante visto que faz parte do próprio fabrico. A secagem fundamenta-se em diversas razões das quais se destacam, os requisitos exigidos no produto final, a qualidade de produto, a redução de custo de transporte, a conservação do produto, etc.

O Estudo do processo de secagem, possibilita a otimização e o aumento da cadência de produção: os fenómenos que governam este tipo de operação são a transferência de massa e de calor. Como existe energia e tempo envolvidos no processo, o seu custo determina os custos de produção, devendo ser minimizados.

As tecnologias de secagem podem ser classificadas como naturais ou artificiais, dependendo da forma como é fornecido o calor, o movimento de ar e a ventilação. Os mecanismos naturais não contem qualquer tipo de dispositivo a impor o escoamento de ar, enquanto os mecanismos artificiais, são realizados com auxílio mecânico, forçando ar a passar ao longo da superfície do sólido.

Os fenómenos de transferência de massa e calor estão na base dos mecanismos de secagem e são utilizados para retratar duas situações diferentes, nomeadamente migração de água no interior do sólido, designada por difusão, e a migração da água entre a superfície e o ambiente, através da transferência convectiva. Estes dois fenómenos são rigidamente ligados pela condição a que se encontra a superfície do sólido. O fator que impõe a quantidade de transferência de massa é definido pelas características físico-químicas do sólido, e pelas características do fluido utilizado na secagem.

Através de um estudo da cinética de secagem é possível avaliar a influência, que cada configuração do material e que cada parâmetro ambiental exerce no processo de secagem.

O material utilizado neste estudo é papel obtido a partir de fibras de algodão e possui características diferentes do papel comum, razão pela qual os processos atuais de secagem não são os mais adequados.

Com base na revisão bibliográfica, foram selecionadas as ferramentas e procedimentos experimentais para a realização e obtenção dos resultados, bem como as ferramentas a utilizar na respetiva modelação.



Os objetivos deste trabalho incluem, a caracterização do comportamento do papel durante o processo de secagem sendo para tal necessário utilizar uma instalação de secagem, realizar medições de massa rigorosas e verificar as condições ambiente adequadamente. Como resultado do esforço experimental são obtidas as curvas de secagem do papel, de forma a analisar a cinética de secagem e construir e validar o modelo matemático da simulação de secagem que preveja, para diferentes condições ambientais, a variação do teor de água no interior da amostra.

# Capítulo 2

## 2.1 Estado de arte

Neste capítulo são apresentados os princípios básicos que levam à concretização dos objetivos deste trabalho. A abordagem tem como objetivo principal identificar os parâmetros que caracterizam a cinética de secagem e caracterizar o material em estudo.

Inicialmente são descritos os princípios básicos subjacentes aos processos de secagem e seguidamente são apresentados vários métodos de secagem.

## 2.2 Transferência de massa

A transferência de massa que ocorre durante a secagem, é uma combinação, transferência de calor a partir do ambiente para a superfície do material e de transferência de água no interior para a superfície.

De acordo com a teoria difusiva isotérmica, à superfície do material é a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar que determinam a taxa de transferência de massa. No interior do sólido são as características físicas do sólido e o seu teor de humidade que determinam a transferência de massa.

No presente caso, em que se procura caracterizar a secagem convectiva, o princípio que governa as trocas de calor e de massa é a convecção forçada. Quando o ar se movimenta ao longo da superfície, a água saturada presente na superfície do sólido é evaporada e transferida para a corrente gasosa.

O processo acima descrito está sumariado na figura (2.1) que representa o que ocorre numa superfície, onde a concentração molar na superfície ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ) é designada por  $C_{A,s}$  e na corrente livre é  $C_{A,\infty}$ .

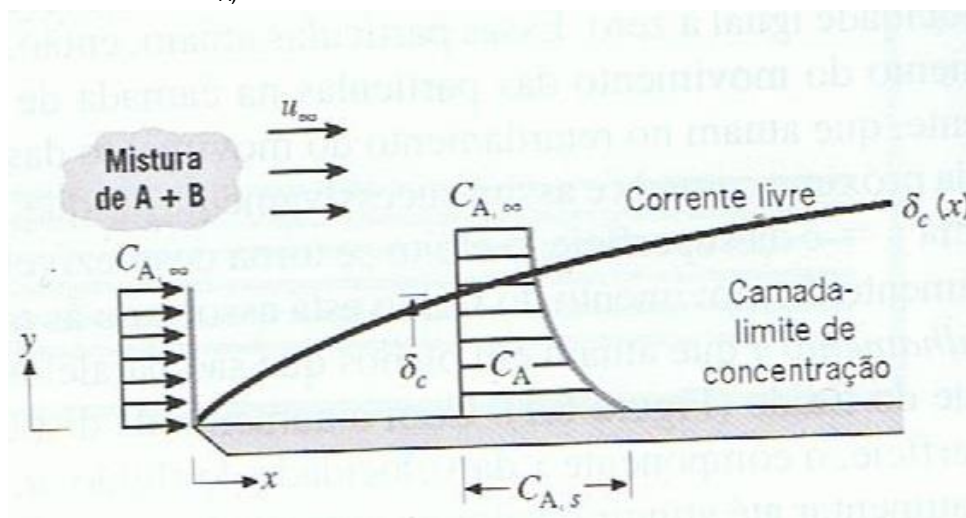


Figura 2.1 Desenvolvimento da camada-limite (Incropera et al., data)



$$N_A = \overline{h_m}(C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (2.1)$$

O coeficiente de transferência de massa,  $\overline{h_m}$  é calculado com base na equação (2.2), com recurso ao número de *Sherwood* e é determinado em função de  $L$ ,  $Re$ ,  $Sc$ ; tal como indicado na equação (2.2) ( Incropera et al., data):

$$\overline{Sh}_l = \frac{\overline{h_m} \times L}{D_{AB}} = f(Re_L, Sc) \quad (2.2)$$

Para determinar a concentração na corrente livre de ar  $C_{A,\infty}$  é essencial obter a humidades relativa presente no escoamento de ar.

A humidade relativa é a relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de vapor de água saturado nas mesmas condições de temperatura.

A concentração mássica no interior do sólido, é representada pela percentagem de água por unidade de volume existente no seu interior e é determinada com base na massa de água e do sólido totalmente seco.

## 2.3 Difusão

A difusão é um processo no qual a matéria é transportada em função de um gradiente de concentração. Neste caso, o movimento de água ocorre do plano central da folha de papel até a superfície, sendo o sentido e a direção determinado pelo valor da concentração em cada ponto do sistema.

A taxa de transferência de massa é diretamente proporcional ao valor da difusividade. Do ponto de vista da abordagem que é feita, a taxa de transferência de massa por difusão é proporcional ao gradiente de concentração existente na normal à área considerada, e é definida pela lei de Fick dada por (Crank,1975).

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.4)$$

## 2.4 Principais equipamentos de secagem

Atualmente existe uma variedade de métodos e equipamentos de secagem para produtos, cada um adequado a uma gama de produtos, uma vez que cada um possui inúmeras limitações e requisitos.(C. M. van 't Land)

### **Secador Descontínuo por vácuo:**

O secador descontínuo por vácuo é indicado para produtos que não podem ser submetidos a temperaturas superiores a 30°C.O mecanismo responsável pela secagem é a redução de pressão total da atmosfera a qual é obtida à custa de uma bomba de vácuo. Nestas circunstâncias, não há aumento da temperatura no produto. Este secador



é simples mas exige uma peneira para impedir que o material permaneça aglomerado. O secador descontínuo por vácuo é considerado um secador económico uma vez que o processo não envolve calor. (C. M. van 't Land)

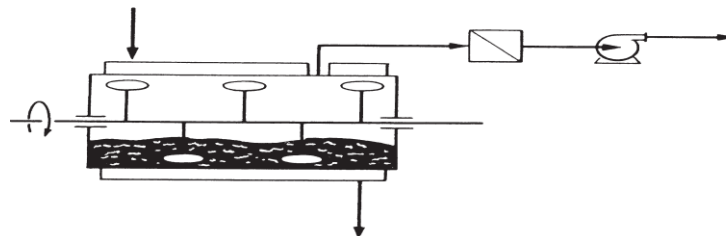


Figura 2.2 Secagem por vácuo (C. M. van 't Land)

#### **Secador descontínuo em leito fluidizado;**

Este tipo de secador é destinado a secar partículas pequenas através do ar quente. Possui a configuração ilustrada na (figura 2.3), e é energeticamente mais eficiente do que secadores com porte superior.

O material é introduzido no interior do secador sobre uma placa perfurada, que possibilita a passagem de ar quente, podendo a espessura da camada de material variar 0.3 a 1 m. Este secador é amplamente utilizado para a secagem de produtos químicos e farmacêuticos. (C. M. van 't Land)

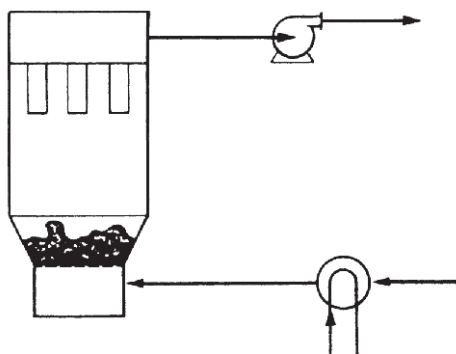


Figura 2.3 Secador leito fluidizado (C. M. van 't Land)

#### **Secadores contínuos em leito fluidizado;**

Os secadores de leito fluidizado foram introduzidos nos Estados Unidos e no Canadá em 1948 e operam normalmente com temperaturas até 800°C. (C. M. van 't Land)

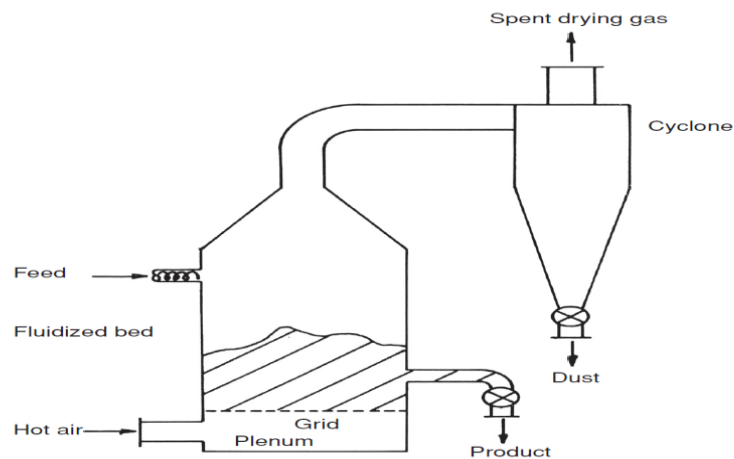


Figura 2.4 Secadores Fluid-bed(C. M. van 't Land)

### Secador contínuo rotativo de aquecimento direto;

Neste tipo de secador o material é alimentado continuamente e seco pelo calor provindo do cilindro interior como está representado na figura 2.5. A secagem decorre enquanto a massa é transportada ao longo do cilindro exterior, tal como está representado na figura 2.6.

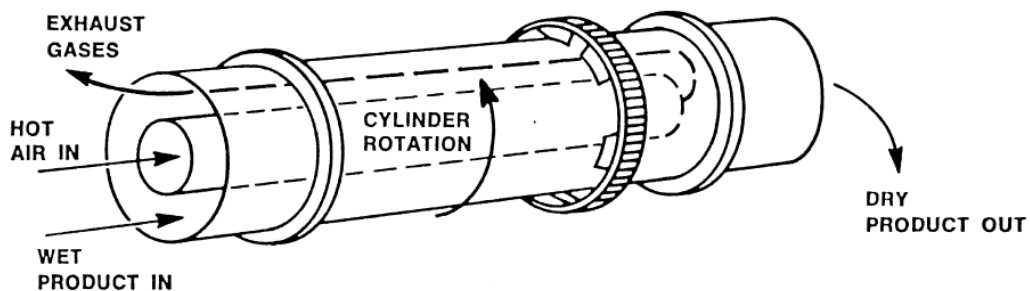


Figura 2.5 Secador contínuo rotativo de aquecimento direto (C. M. van 't Land)

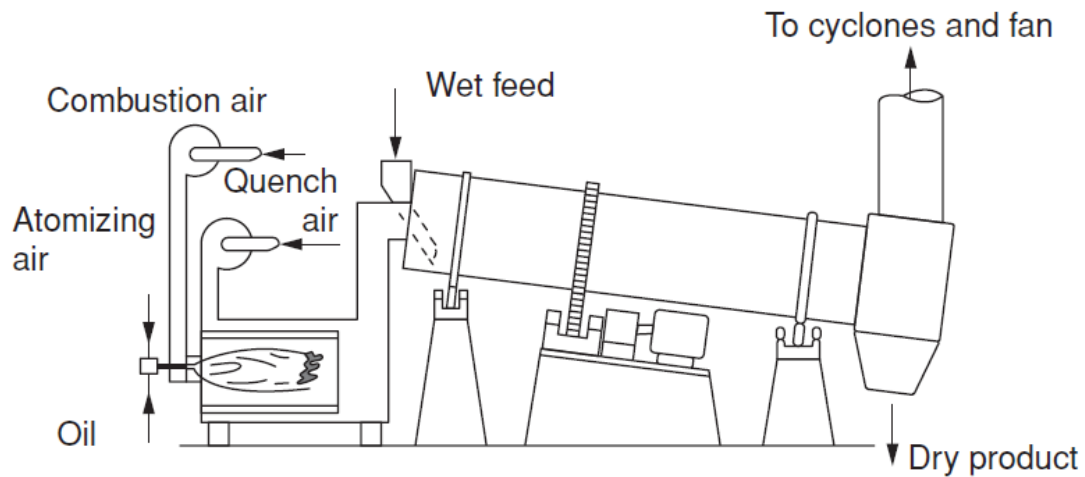


Figura 2.6 Modo de funcionamento do secador rotativo (C. M. van 't Land)

### **Secador *Flash*.**

O secador *flash* é composto por um longo tubo que transporta gás a alta velocidade, impulsionado por um ventilador. O material é alimentado de forma adequada ao escoamento de gás dispersando-se as partículas pelo escoamento (figura 2.7).

A secagem é realizada, mais facilmente uma vez que as partículas têm tamanhos suficientemente pequenos. Neste tipo de produto a difusividade do material não é uma limitação da secagem. Os secadores instantâneos são normalmente alimentados por um parafuso sem-fim. (C. M. van 't Land)

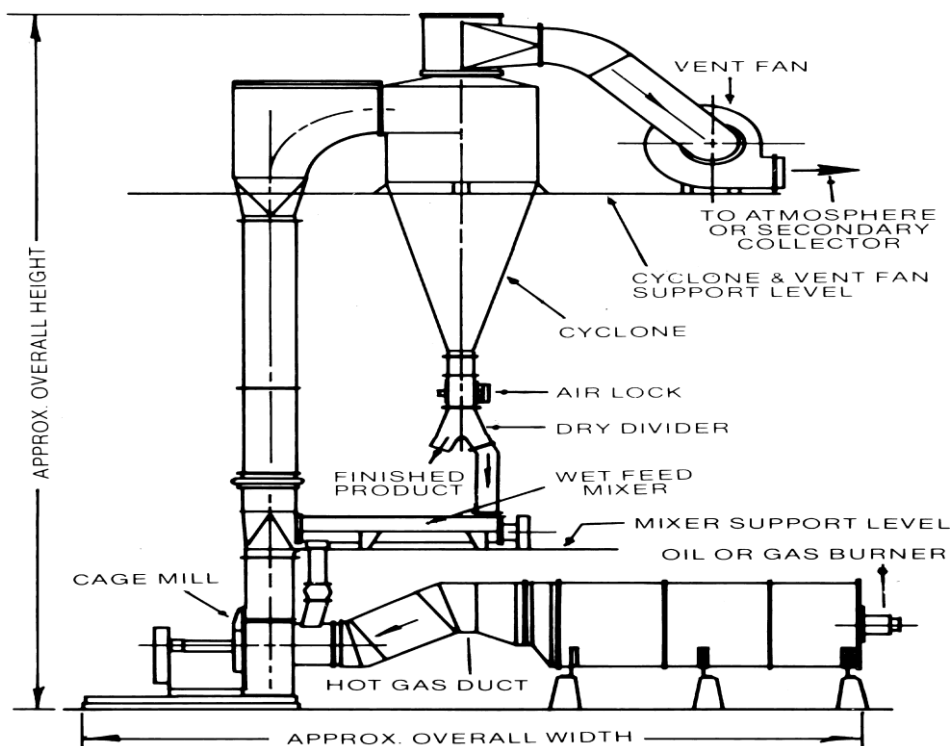


Figura 2.7 Secador (C. M. van 't Land).

## 2.5 Modelação

A modelação é uma ferramenta muito importante, na otimização, no dimensionamento e na realização de estudos de viabilidade. Neste trabalho a simulação é utilizada para determinar o teor de água numa amostra ao longo do tempo.

Existem diversos modelos que possibilitam a simulação numérica dos processos de secagem os quais podem ser classificados como modelos empíricos, semi-empíricos, e teóricos.

Os modelos empíricos baseiam-se essencialmente nas observações realizadas experimentalmente, em diferentes condições: numa determinada experiência onde é imposta uma determinada condição, verifica-se qual é o resultado obtido, negligenciando qualquer conceito teórico sendo o modelo construído a partir da correlação entre a variação da variável de entrada e o resultado obtido.

Nos modelos semi-empíricos uma lei teórica (por exemplo o decaimento exponencial do teor de água num sólido) é combinada com uma componente experimental, não se assumindo a complexidade total do problema.

Os modelos teóricos têm em consideração todos os fenómenos físicos associados ao processo em estudo. Normalmente os princípios de conservação e de transporte são expressos através de equações diferenciais as quais deverão ser resolvidas simultânea ou independentemente.

Neste trabalho experimental é utilizado o modelo semi-empirico, uma vez que foram utilizados os conceitos teóricos, mas a difusividade foi determinada experimentalmente.

# Capítulo 3

## 3.1 Método e procedimento experimental

Ao longo deste capítulo é apresentado o procedimento experimental, tal como o material testado, os equipamentos utilizados e a respetiva parametrização.

## 3.2 Estação de secagem

A estação de secagem consiste num equipamento composto por vários elementos, os quais garantem o seu funcionamento de forma totalmente controlada. A estação de secagem é composta por uma conduta de circuito fechado, onde os vários elementos garantem o controlo das condições do ar, sendo acionados em função dos parâmetros introduzidos.

Os dispositivos de leitura medem as condições na estação de secagem, nomeadamente a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar. Com base na informação recolhida o *software* realiza o processamento e os dispositivos de controlo atuam em função dos parâmetros introduzidos.



Figura 3.1 Estação de secagem.

A representação esquemática da estação de secagem está ilustrada na figura 3.2;

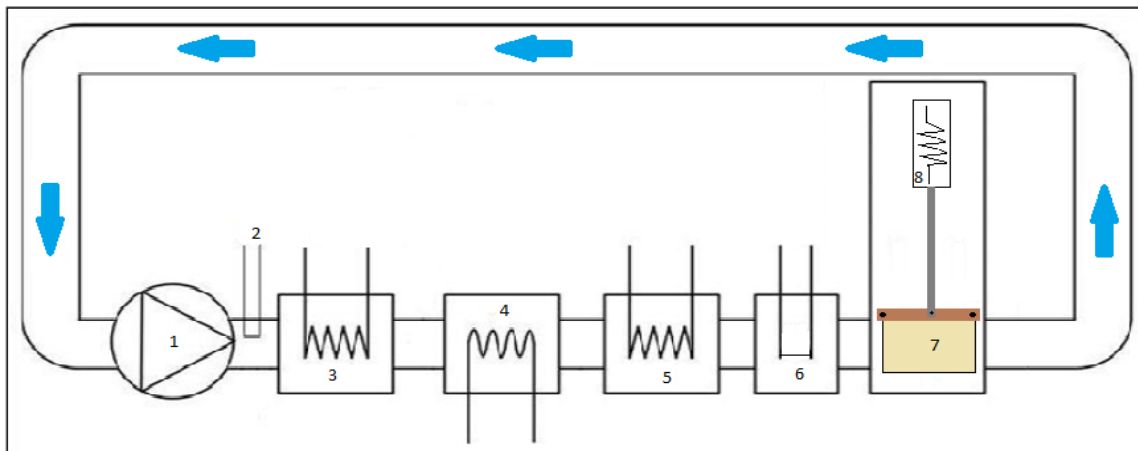


Figura 3.2 Esquema da estação de secagem

- 1- Ventilador centrífugo;
- 2- Humidificador;
- 3- Resistências elétricas de 2 kW;
- 4- Desumidificador/arrefecedor;
- 5- Resistências elétricas de 1 kW;
- 6- Anemómetro de fio quente;
- 7- Folha de papel;
- 8- Célula de carga;

O ventilador força a circulação de ar no interior da estação com velocidade regulada, sendo aquecido pelas resistências elétricas que se encontram no circuito. O controlo de humificação do ar é efetuado através da injeção de água na forma de *spray*. O arrefecedor/ desumidificador é constituído por uma serpentina, no qual circula um fluido refrigerante que exerce funções de controlo de temperatura e da humidade relativa do ar.

### 3.3 Determinação da massa instantânea da amostra

Para determinar a perda de massa da amostra é utilizada uma célula de carga tal como se mostra na figura 3.3.



Figura 3.3 Célula de carga



A célula de carga (INTERFACE-MODEL SMT1-25N) está fixa no exterior da estação, (Figura 3.3), para minimizar o ruído do sinal medido. A barra metálica é rigidamente fixa à célula de carga para garantir que a posição da folha de papel é sempre paralela ao escoamento. A suspensão do papel é efetuada através da fixação de um caixilho de madeira que comporta a amostra de papel a secar, o qual está também rigidamente ligado à barra metálica.

A célula de carga regista valores a cada segundo. Para diminuir o ruído provocado pelo escoamento de ar, o ventilador pára ao fim de 270s, reiniciando o seu funcionamento após 30 segundos. Na realização dos cálculos são considerados os valores registados durante os 30 segundos em que ventilador se encontra parado. Os dados são armazenados no computador, através do *software MatLab® 7.0.1*, utilizando a curva de calibração adequada.

### 3.4 Controlo da instalação

O controlo da instalação é feito em tempo real através de um computador onde está instalado o *software Matlab*. Os dados de velocidade do ar e de humidade relativa são lidos através de um anemómetro de fio quente e de um termo-higrómetro (VAISALA-HMT). O *software* realiza o processamento comparando as condições na estação de secagem com os parâmetros desejados.



Figura 3.4 Computador da instalação

### 3.5 Amostra de papel

Nos ensaios foram utilizadas três amostras de papel, com teor de água uniforme que estão representados nas figuras (3.5) e (3.6).



Figura 3.5 Papel fino de cor (0.24) (em bruto).



Figura 3.6 (papel branco (0.94mm) – papel de cor riscado (0.94mm))

A tabela 3.1 representa a gramagem e teor de água inicial do papel.

	Gramagem (g/m <sup>2</sup> )	Teor de humidade inicial
1º Papel Branco	512,14	0,48
2º Papel Branco	494,82	0,46
3º Papel Branco	513,57	0,48
4º Papel Branco	489,64	0,44
5º Papel Branco	484,64	0,48
1º Espesso riscado de cor	486,07	0,55
2º Espesso riscado de cor	486,79	0,53
3º Espesso riscado de cor	551,43	0,55
1º Fino riscado de cor	106,07	0,66
2º Fino riscado de cor	95,36	0,64
3º Fino de cor riscado	103,57	0,60
4º Fino de cor riscado	102,86	0,61
5º Fino de cor riscado	109,29	0,60

Tabela 3.1 Características do papel





### 3.6 Determinação do teor de água da amostra.

O Teor de água instantâneo é determinado pela equação (3.1)

$$X_{bu} = \frac{(m(t) - m_f)}{m(t)} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde;

$X_{bu}$  = Teor de água em base húmida (%)

$m(t)$  = Massa instantânea(g)

$m_f$  = Massa final (g)(amostra totalmente seca)

Para realizar a comparação entre as diferentes experiências, o teor de água foi representado na forma adimensional e é igual à razão entre o teor de água instantâneo e o teor de água inicial (equação 3.2)

$$X_{adimensional} = \frac{X_{instantâneo(t)}}{X_{inicial}} \quad (3.2)$$

$X_{instantâneo(t)}$  – Teor de água em cada instante (%)

$X_{inicial}$  – Teor de água no instante inicial (%)

$X_{adimensional}$  – Teor de água adimensional (%)

### 3.7 Taxa de secagem

A taxa de secagem é determinada em função do teor de água em base húmida de acordo com a equação 3.3.

$$T = \frac{X_{bu(t+300)} - X_{bu(t)}}{300} \times \frac{1}{3600} \quad (3.3)$$

$T$  – Taxa de secagem (g de água /h)

### 3.8 Planeamento experimental

O processo de secagem do papel foi planeado com três variáveis independentes, nomeadamente a humidade relativa (40%,47%,50%), a temperatura (40°C,50°C,60°C) e a velocidades do escoamento de ar (1.5m/s 2.5m/s). Os valores foram selecionados com o objetivo de realizar testes próximos às condições típicas industriais, sendo estes contudo condicionados pelas limitações da instalação. Quanto ao papel, foram utilizados três tipos de papel, papel branco, papel de cor espesso e papel de cor fino. Neste caso, a variável dependente é a massa instantânea do papel húmido.

Na Tabela (3.2) está representado o plano experimental

Tipo de papel	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Humidade relativa (%)	Espessura do papel (mm)
1º Papel Branco	40	1,5	40	0.94
2º Papel Branco	50	1,5	47	0.94
3º Papel Branco	50	1,5	40	0.94
4º Papel Branco	40	2,5	40	0.94
5º Papel Branco	50	2,5	50	0.94
1ºPapel de cor espesso	40	1,5	40	0.94
2ºPapel de cor espesso	50	1,5	40	0.94
3ºPapel de cor espesso	50	1,5	50	0.94
1º Papel fino de cor	40	1.5	40	0.21
2º Papel fino de cor	50	1.5	40	0.21
3º Papel fino de cor	50	1.5	50	0.21
4º Papel fino de cor	60	1.5	30	0.21
5º Papel fino de cor	50	2.5	50	0.21

Tabela 3.2 Plano experimental

S

### 3.9 Procedimento experimental

A amostra é retirada do papel em bruto, com tamanho próximo ao de uma folha A4. De seguida são efetuados os seguintes procedimentos: é pesada na balança; é colocada na moldura; é acoplada à barra ligada à célula de carga. Dá-se então início ao processo de secagem acionando o secador laboratorial com os parâmetros de secagem pré-definidos. A secagem é considerada como terminada quando deixa de existir transferência de massa para o ambiente, ou seja, quando o valor da massa da amostra permanece constante, retirando-se então a amostra da estação. No final pesa-se novamente a massa da amostra na balança, para confirmar a perda total de massa.

Paralelamente ao processo de secagem, é efetuado um outro procedimento numa estufa presente no laboratório de termo-fluidos, a qual tem como objetivo principal obter o teor de água do papel no instante inicial e final de cada experiência.

Este processo consiste em introduzir no interior da estufa seis amostras de papel, durante 72 horas, à temperatura de 105°C. As amostras são pesadas no início e no fim do processo de secagem na estufa. O objetivo deste procedimento é determinar o teor de água inicial da amostra. Repete-se o mesmo procedimento para as amostras retiradas da estação de secagem, com o objetivo de obter o teor de água da amostra no final da experiência.



# Capítulo 4

## 4.1 Resultados

Neste capítulo são descritos os resultados recolhidos durante a condução do procedimento experimental e é representada e analisada a influência dos parâmetros externos.

No presente capítulo são ainda apresentadas as curvas de temperatura, da humidade relativa e da velocidade do ar, obtidas no interior da estação, bem como as curvas do teor de água reais e adimensionais em função do tempo, para possibilitar a análise da cinética de secagem.

## 4.2 Condições impostas no interior da estação de secagem

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, estão representadas a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar registadas no decorrer da operação de secagem do Papel Branco durante o 1º ensaio. Os gráficos referentes às condições registadas nos restantes ensaios encontram-se no anexo A.

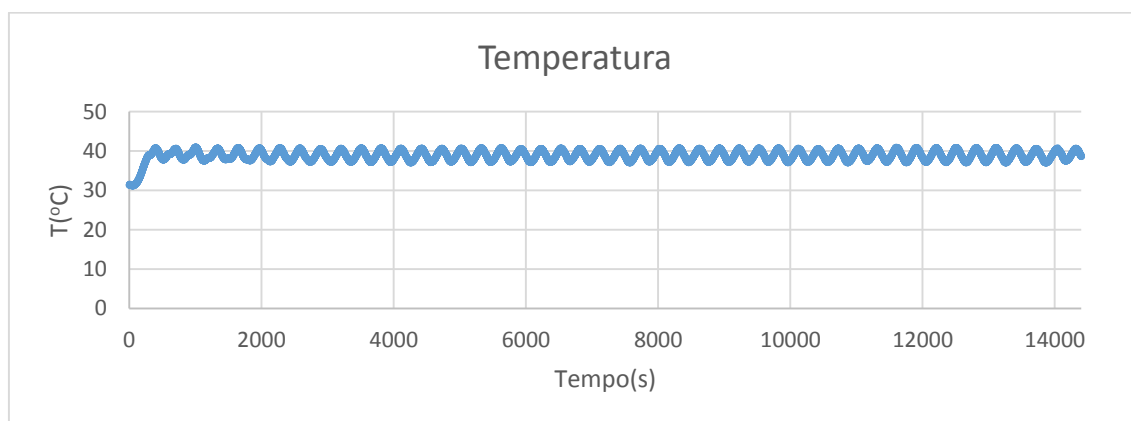


Figura 4.1 Temperatura no interior da estação de secagem (objetivo de 40°C)

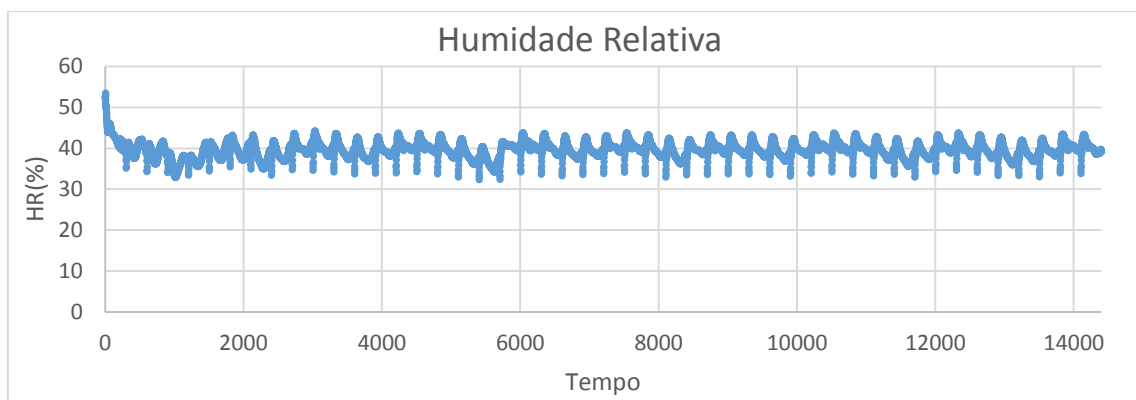


Figura 4.2 Humidade relativa no interior da estação de secagem (objetivo de 40%)

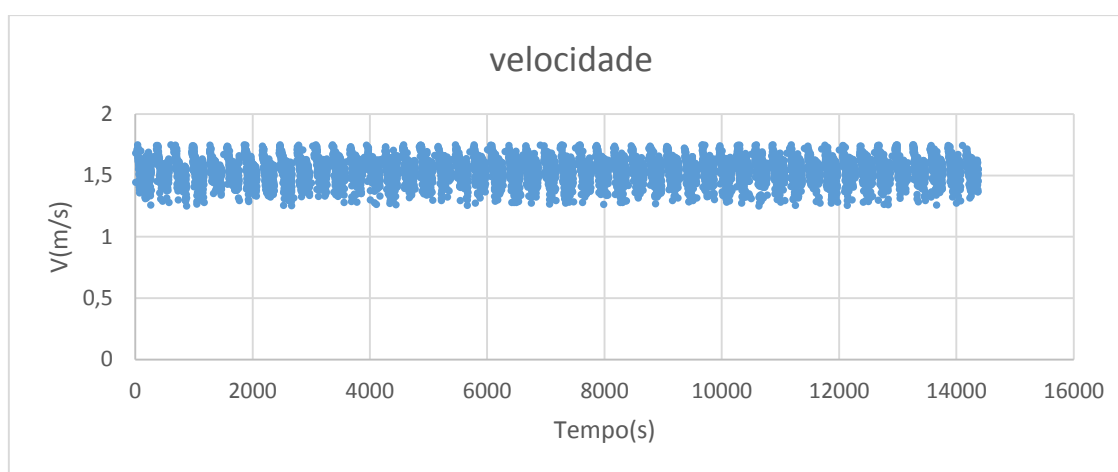


Figura 4.3 Velocidade no interior da estação de secagem (objetivo de 1.5m/s)

Para a generalidade dos procedimentos experimentais foram alcançadas as condições próximas ao pretendido, exceto no caso em que era pretendida uma temperatura de 50°C e uma humidade de relativa de 50%. Neste caso, a temperatura é alcançada mas a humidade relativa não, devido as limitações da instalação. As oscilações periódicas presentes no gráfico representam as paragens do ventilador a cada 300 segundos.

### 4.3 Cinética de secagem

Os ensaios evidenciam comportamentos semelhantes, no que diz respeito à perda de massa. A figura 4.4 representa a evolução de massa de água numa amostra de papel (1º ensaio papel Branco). Para cada ensaio, foi feita uma análise relativamente à cinética de secagem, segundo as condições estabelecidas. As representações dos resultados obtidos nos restantes ensaios estão em anexo B.

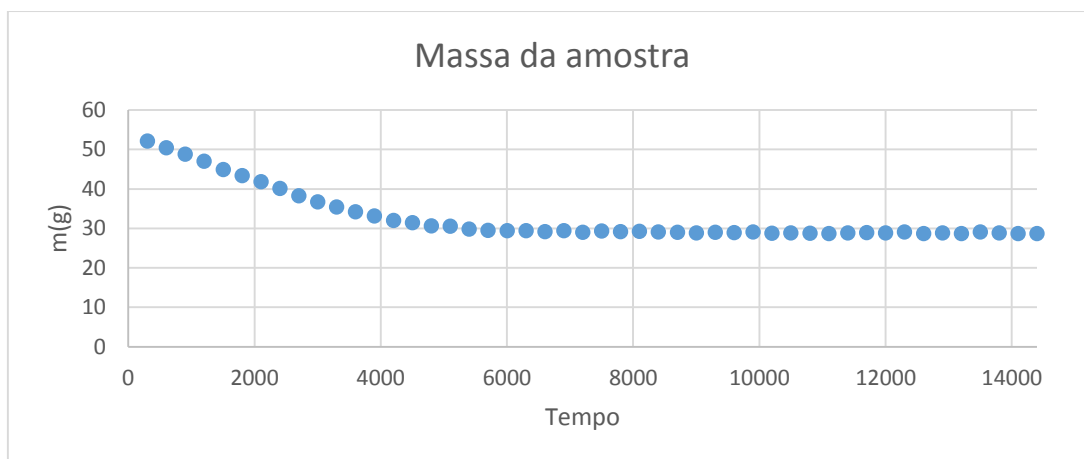


Figura 4.4 Variação da massa da amostra (1º Papel branco)

Na Figura 4.4 verifica-se que a variação da massa ao longo do tempo é inicialmente linear tendendo para um valor a partir do qual a secagem deixa de ocorrer. Todas as curvas dos gráficos descrevem esta tendência.

#### 4.4 Efeito da temperatura na secagem

A figura (4.5) representa a variação do teor de água, em dois procedimentos experimentais com papel de cor espesso, em que a temperatura foi de 40°C e 50°C, sendo mantidas a humidade relativa e a velocidade do escoamento de ar. As representações dos restantes ensaios encontram-se no anexo C.

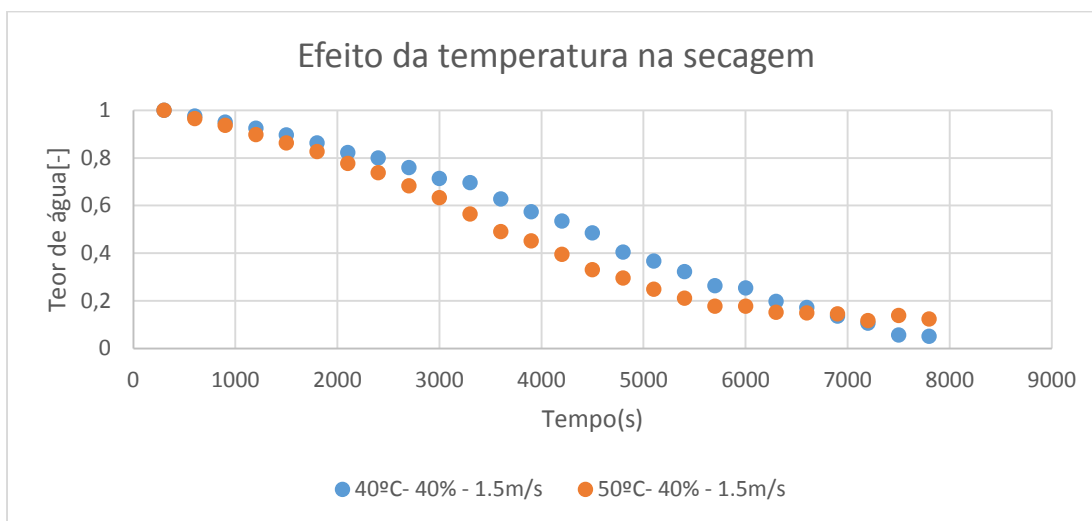


Figura 4.5 Efeito da temperatura na secagem do papel de cor espesso

O aumento da temperatura provoca o aumento da taxa de secagem e consequentemente a diminuição do tempo de secagem.

O papel de cor espesso, e o papel fino de cor verificam o efeito descrito no parágrafo anterior. Quanto ao papel branco, tem um comportamento algo distinto não sendo claras as correlações entre o aumento de temperatura e o aumento da taxa de secagem.

## 4.5 Efeito da Humidade Relativa de secagem

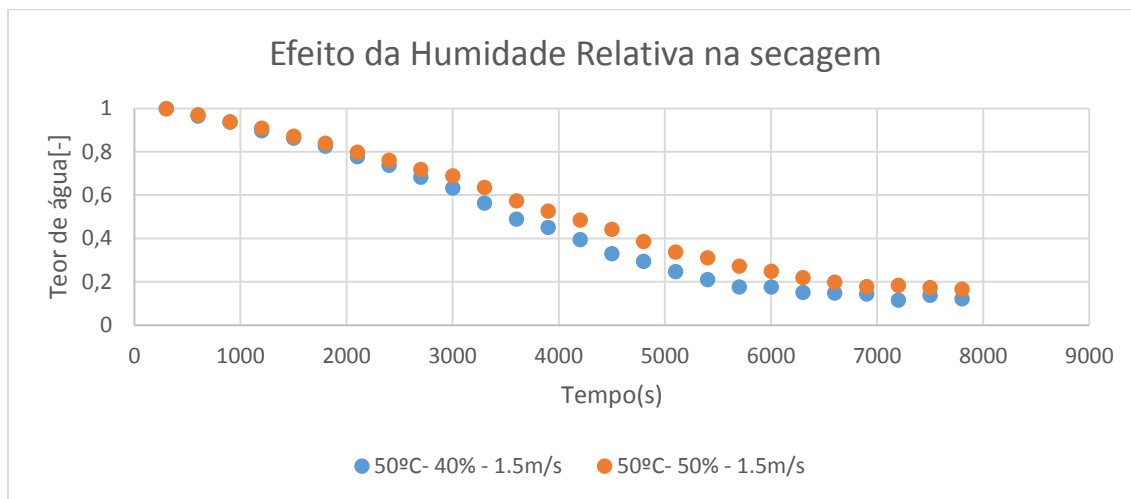


Figura 4.6 Efeito da humidade relativa na secagem do papel de cor espesso

Para uma humidade relativa de 40%, a secagem realiza-se mais rapidamente do que para a humidade relativa de 50% uma vez que a capacidade de remoção de água à superfície é proporcionalmente maior (eq. 2.1). Este efeito é mais evidente no papel de cor espesso, como se pode verificar no anexo C.

## 4.6 Efeito da velocidade do ar na secagem

O efeito da velocidade do ar é bastante notório na transferência de massa. A equação 2.2 mostra que, sendo  $Sh$  diretamente proporcional a  $Re^{\frac{1}{2}}$  e sendo o número de  $Re$  diretamente proporcional à velocidade do escoamento de ar, este parâmetro terá uma influência notória no tempo de secagem. O efeito da velocidade do ar, é representado na figura 4.7, na secagem de papel branco, para dois valores da velocidade.

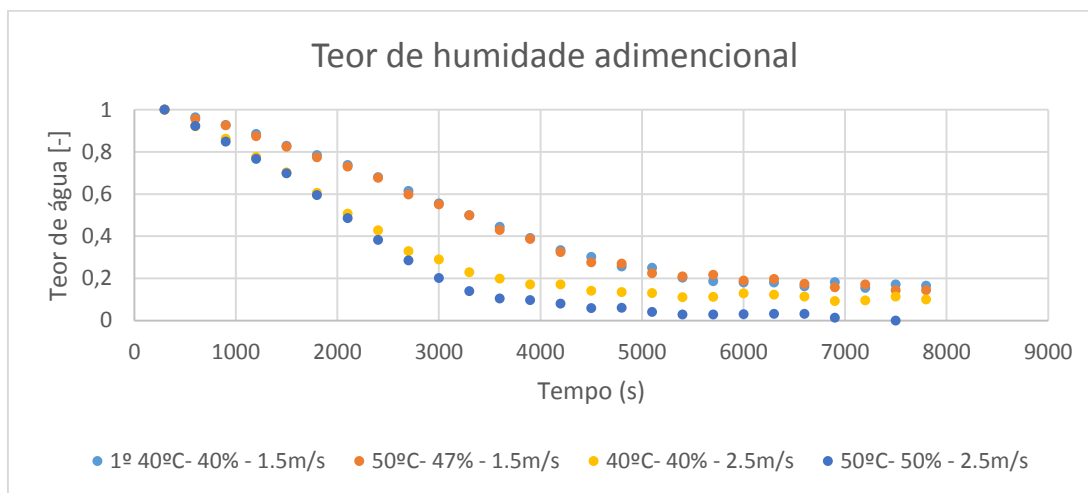


Figura 4.7 Efeito da velocidade do ar na secagem do papel branco

O efeito da velocidade do ar na taxa de secagem é refletido na generalidade dos ensaios, isto é, um aumento da velocidade do ar geralmente reduz o tempo de secagem.

## 4.7 Efeito da espessura

A espessura do papel influencia o tempo de secagem, sendo este menor para espessuras de 0.21 mm. A figura 4.8, representa o teor de água das amostras ao longo do tempo nas seguintes condições operacionais de 50°C, 40% e 1.5m/s, para cada tipo de papel.

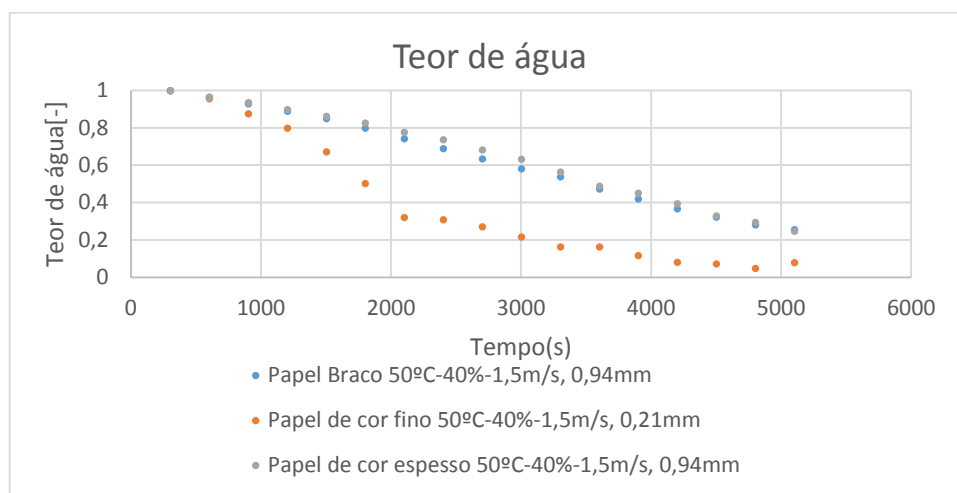


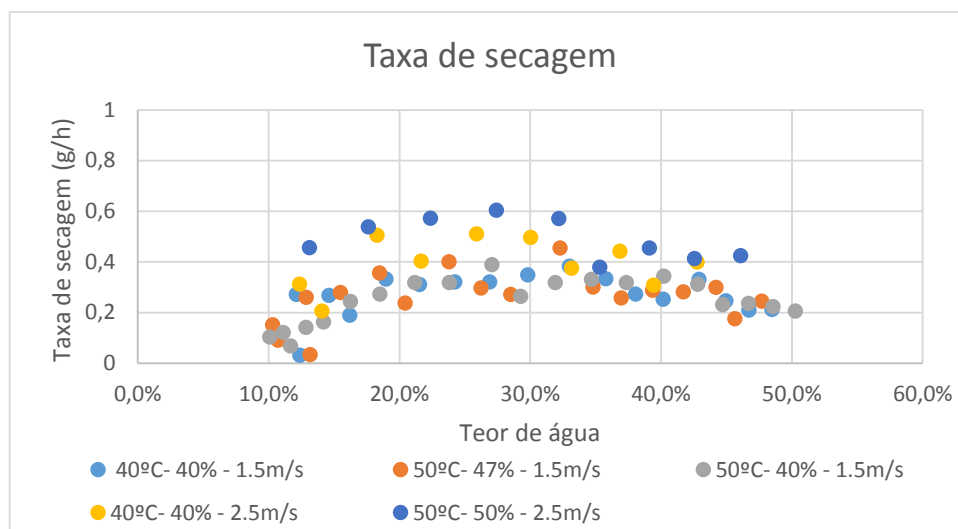
Figura 4.8 Efeito da espessura do papel na secagem

Esta comparação evidência a influência de um fator endógeno. Para menores espessuras a resistência à transferência de massa no interior do papel é menor, o que de acordo com a lei de Fick, possibilita um maior fluxo interno de água para a superfície

O resultado permite constatar que, no presente estudo a taxa de transferência de massa é limitada pela difusividade, e não pelo coeficiente de transferência de massa. Isto é, como o coeficiente de transferência de massa é constante para iguais condições ambientais, este não influencia a taxa de transferência de massa. Segundo a lei de Fick pode afirma-se que a taxa de transferência de massa por difusão é inversamente proporcional à espessura do material, evidenciando assim a resistência à transferência de massa, causada pela difusividade. Os gráficos relativos aos restantes ensaios encontram-se representados em anexo C.

## 4.8 Taxa de secagem

A figura 4.9 representa a taxa de secagem em (g de água/h) em função do teor de água. Os valores da taxa de secagem aumentam até atingir o valor máximo, que se encontra entre os [20%, 30%] de teor de água, a partir dos quais começam a diminuir até ao fim da experiência. Os restantes gráficos estão representados no anexo D.



*Figura 4.9 Curvas da taxa de secagem para diferentes velocidades com papel branco*



# Capítulo 5

## 5.1 Modelação do processo de secagem

Neste capítulo é apresentada a modelação do processo de secagem. Ao longo da secagem existem dois coeficientes que condicionam a transferência de massa, são o coeficiente de transferência de massa e a difusidade. O coeficiente de transferência de massa determina a quantidade de massa de água transferida entre a superfície do papel e o ambiente, o seu valor depende das condições ambientais presentes na estação de secagem. A difusidade é a variável que condiciona a migração de água no interior do papel, e que depende do tipo de papel (Incropera et al., data). Tanto o coeficiente de transferência de massa como a difusividade são determinados experimentalmente.

## 5.2 Determinação do coeficiente de transferência de massa na superfície do papel

O coeficiente de transferência representa a taxa com que a massa é transferida para o ambiente e depende das condições a que se encontra o ar que se escoia sobre a superfície do sólido.

Para o cálculo do coeficiente de transferência de massa, considerou-se o caso de placa plana em escoamento paralelo, sendo este, o tipo de escoamento que mais se ajusta ao presente caso, como pode ser observado nas figuras 5.1 e 5.2 onde se mostra o alinhamento da folha de papel com o eixo da conduta da instalação experimental e o mecanismo de transporte de água do interior do papel para a superfície e desta para o escoamento.



*Figura 5.1 Posicionalmente das folhas no escoamento de ar*

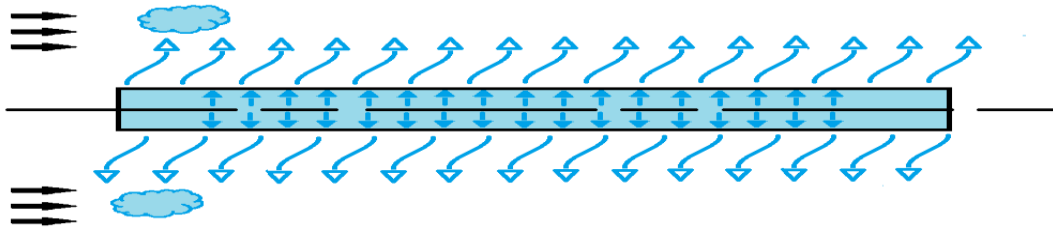


Figura 5.2 Esquema representativo da transferência de massa.

Inicialmente foi determinado o número de Reynolds (equação 5.1), com o objetivo de identificar o tipo de escoamento presente sobre a folha de papel.

$$Re = \frac{u_{\infty} \times L}{\nu} \quad (5.1)$$

O coeficiente de transferência de massa é função do número de *Sherwood*. Com a caracterização do escoamento, determinou-se o número de *Sherwood* médio associado a este tipo de escoamento, (Incropera et al., data) usando as equações 5.2 e 5.3.

$$\overline{Sh}_L = \frac{\bar{h}_m \times L}{D_{AB}} = 0.664 Re_L^{1/2} Sc^{1/3} \quad (5.2)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (5.3)$$

Visto que o número de Reynolds não é superior ao valor  $5 \times 10^5$  escoamento é laminar ao longo de toda a superfície.

Como não existe informação da temperatura na superfície do papel, considerou-se uma temperatura de 30°C. Foram obtidos os resultados apresentados na tabela 5.1 através da bibliografia (Incropera et al., data).

Condições ambientais	Difusividade $D(m^2/s)$	Viscosidade cinemática $\nu (m^2/s)$	Reynolds $Re_{\nu=1.5(m/s)}$	Reynolds $Re_{\nu=2.5(m/s)}$	$\bar{h}_m$ (m/s) $(\nu=1.5(m/s))$	$\bar{h}_m$ (m/s) $(\nu=2.5(m/s))$
40°C 40%	$0.26 \times 10^{-4}$	$17.82 \times 10^{-4}$	24438	40721	0.0084	0.0103
50°C 40%	$0.27 \times 10^{-4}$	$18.20 \times 10^{-4}$	23076	38461	0.0084	0.0103
50°C 50%	$0.27 \times 10^{-4}$	$18.20 \times 10^{-4}$	23076	38461	0.0084	0.0103

Tabela 5.1 Determinação do coeficiente de transferência de massa

Nas condições experimentais utilizadas o coeficiente de transferência de massa é de 0.0084 m/s para uma velocidade de escoamento livre de 1.5m/s e de 0.0103 m/s para um escoamento livre de 2.5 m/s

### 5.3 Determinação da difusividade

Adotou-se um modelo de Fick da difusão para uma placa plana, admitindo uma concentração inicial uniforme e na fronteira uma condição convectiva. De acordo com o modelo de Fick (Crank, 1975), a difusividade pode ser calculada a partir da resolução da equação 5.5. É considerada difusividade unidirecional, sendo o domínio físico limitado por duas fronteiras paralelas, em  $x = 0$  e  $x = l$ . Esta distância corresponde a metade da espessura da folha, desprezando-se a transferência de massa partir das extremidades (Crank, 1975).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L^2 e^{-\frac{\beta_n^2 \times D \times t}{l^2}}}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + L^2 + L)} \quad (5.5)$$

Sendo;

$M_t$  – Total de massa evaporada ao longo do tempo;

$M_\infty$  – Total de massa evaporada ao longo de toda a experiência;

Onde o  $\beta_n$  são as raízes positivas da equação (5.6)

$$\beta \times \tan(\beta) = L \quad (5.6)$$

Em que;

$$L = \frac{l \times \bar{h}_m}{D} \quad (5.7)$$

A difusividade foi determinada com base na equação 5.5, para o instante de tempo que corresponde a 90% do tempo total de secagem. As figuras 5.8, 5.9 e 5.10 representam a proximidade dos dados experimentais ao modelo segundo a difusividade determinada. As restantes representações encontram-se no anexo E.

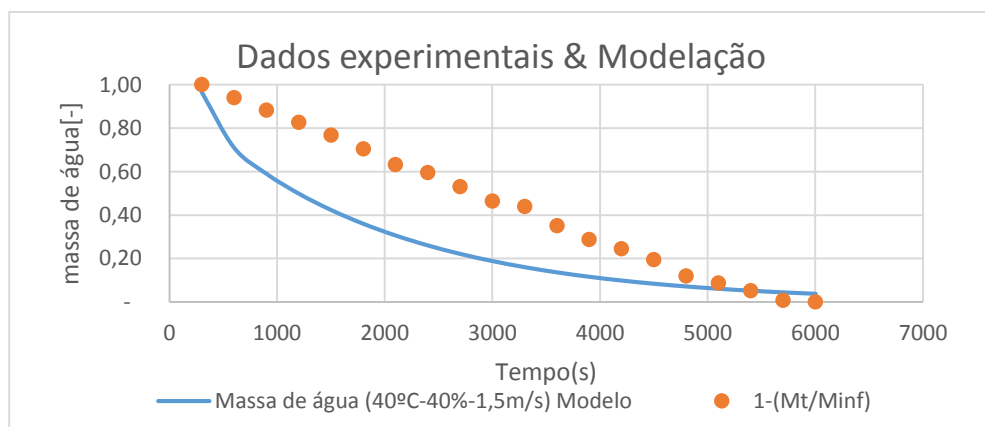


Figura 5.3 Modelo (Papel branco)

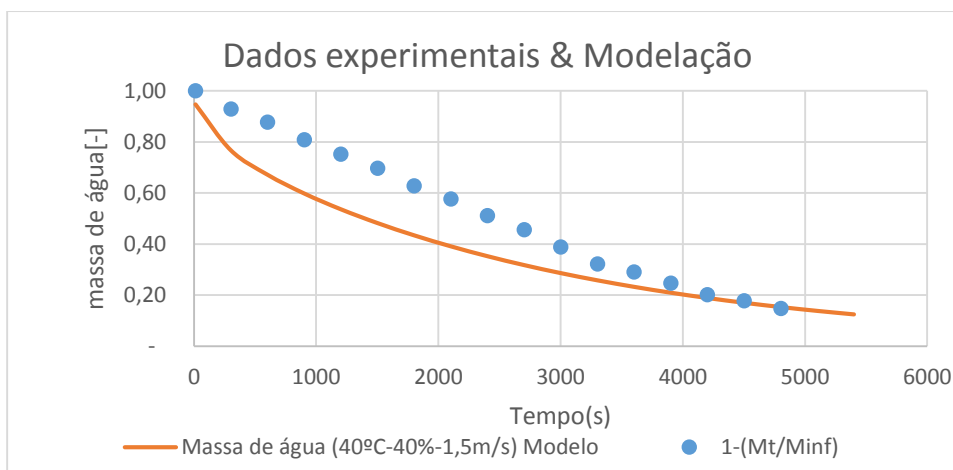


Figura 5.4 Modelo (Papel de cor espesso)

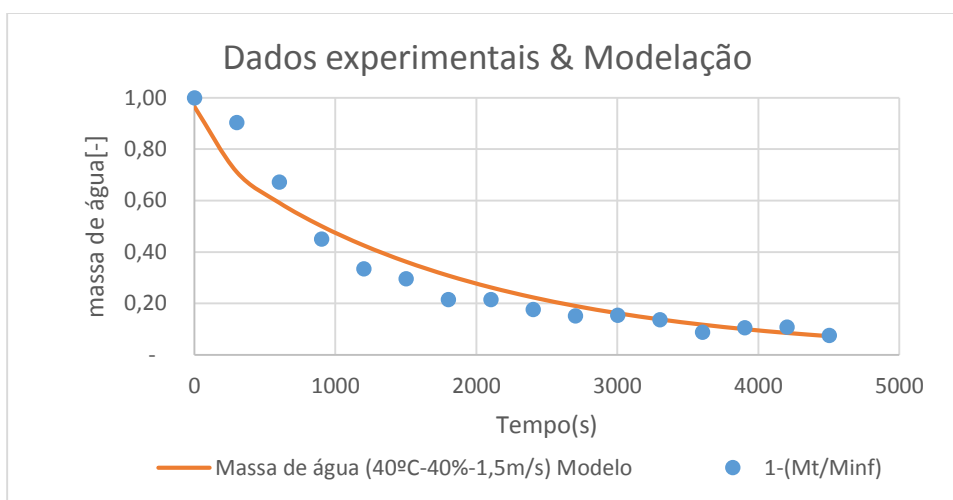


Figura 5.5 Modelo (Papel de cor fino)

A tabela 5.1 representa as difusividades determinadas através da solução da equação 5.5 quando  $M_t = M_{\infty}$ .

Ensaio	T (°C)	HR (%)	V(m/s)	L (mm)	Difusividade (m <sup>2</sup> /s)
PAPEL BRANCO	40	40	1.5	0.94	4,85x10 <sup>-11</sup>
	50	47	1.5	0.94	6,60x10 <sup>-11</sup>
	50	40	1.5	0.94	6.30x10 <sup>-11</sup>
	40	40	2.5	0.94	4.50x10 <sup>-11</sup>
	50	50	2.5	0.94	5.70x10 <sup>-11</sup>
PAPEL DE COR ESPESSE	40	40	1.5	0.94	3.10x10 <sup>-11</sup>
	50	40	1.5	0.94	2.49x10 <sup>-11</sup>
	50	50	1.5	0.94	2.30x10 <sup>-11</sup>
PAPEL DE COR FINO	40	40	1.5	0.21	2.40x10 <sup>-12</sup>
	50	40	1.5	0.21	3.55x10 <sup>-12</sup>
	50	50	1.5	0.21	4.49x10 <sup>-12</sup>
	60	30	1.5	0.21	6.70x10 <sup>-12</sup>
	50	50	2.5	0.21	4.90x10 <sup>-12</sup>

Tabela 5.1 Difusividade determinada para cada ensaio.



## 5.4 Desvio relativo médio

Para analisar a proximidade dos valores obtidos experimentalmente com o modelo matemático e é determinado pela seguinte fórmula:

$$DR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|VM-VE|}{VE} \quad 5.8$$

DR – Desvio relativo médio

VM – Valor obtido através do modelo

VE – Valor obtido experimentalmente

	Desvio relativo médio (%)
1º Papel Branco	66,15
2º Papel Branco	43,67
3º Papel Branco	43,35
4º Papel Branco	12,27
5º Papel Branco	19,69
1º Papel de cor espesso	19,69
2º Papel de cor espesso	15,14
3º Papel de cor espesso	14,02
1º Papel de cor fino	17,52
2º Papel de cor fino	19,58
3º Papel de cor fino	21,32
4º Papel de cor fino	17,11
5º Papel de cor fino	20,49

*Tabela 5.2 Desvio relativo médio*

Outros autores (Massoquete & Committee, 2005) mencionam difusividades próximas às determinadas neste trabalho as quais variam desde 5.9723E-9 m<sup>2</sup>/s até 1.9699E-10 m<sup>2</sup>/s.

## 5.5 Variação do teor de água com a espessura

Através da solução do modelo de Fick (equação 5.9) para as condições fronteira acima descritas (Crank, 1975) é obtida a distribuição do teor de água ao longo de metade da espessura do papel.

$$\frac{C-C_2}{C_0-C_2} = 1 - \sum_{N=1}^{\infty} \frac{2 \times L \times \cos(\beta_n \times x/l) \times e^{\frac{-\beta_n^2 \times D \times t}{l^2}}}{(\beta_n^2 + L^2 + L) \times \cos(\beta)} \quad (5.9)$$

$C$  – Teor de água no instante ( $t$ )

$C_0$  – Teor de água final (%)

$C_2$  – Teor de água inicial (%)

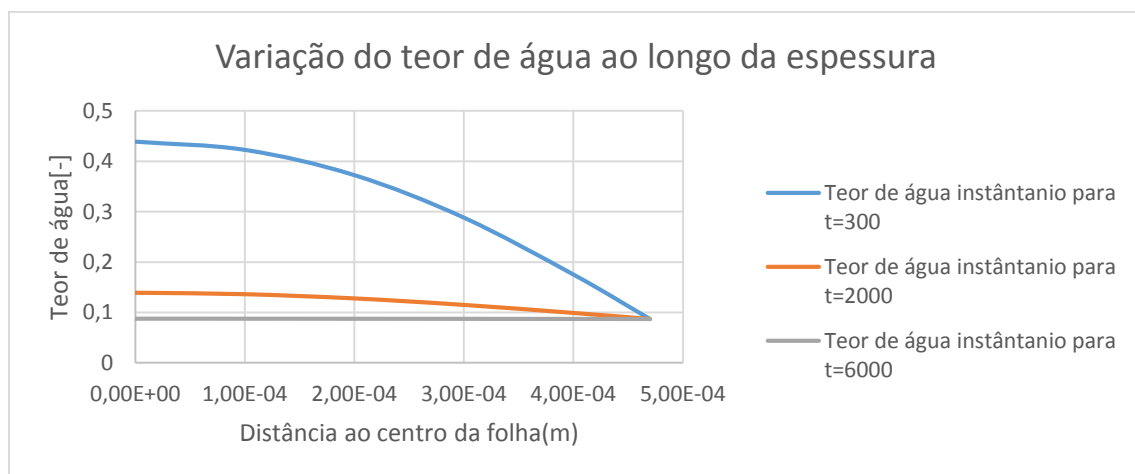


Figura 5.6 Variação do teor de água ao longo da espessura de papel



# Capítulo 6

## 6.1 Conclusões

O presente trabalho, que ilustra a metodologia utilizada no estudo da cinética de secagem de papel obtido a partir de fibras de algodão, e permite concluir que:

1. Todas as amostras de papel apresentam comportamentos semelhantes ao longo do tempo, decrescendo a massa linearmente até se atingir o ponto onde não existe transferência de massa para o ambiente, permanecendo a massa constante até ao fim do ensaio.
2. O coeficiente de transferência de massa condiciona a transferência de massa da superfície para o ambiente e a difusividade condiciona a migração de água no interior do papel.
3. Na cinética de secagem, o aumento de temperatura, geralmente causa o aumento de taxa de secagem, e a consequente redução do tempo de secagem sendo, este efeito mais notório no papel de cor espesso.
4. Para humidades relativas do ar de 40% o processo de secagem também ocorre em menos tempo.
5. O aumento da velocidade do escoamento de ar, provoca o aumento da transferência de massa e esse facto é constatado teoricamente e experimentalmente.
6. Para menores espessuras a transferência de massa é maior.

No futuro será pertinente ampliar o conhecimento da cinética de secagem do papel considerando outras condições experimentais:

1. Aprofundar o conhecimento da difusividade e das suas condicionantes;
2. Utilizar o modelo para previsão das taxas de secagem noutras condições.



## Referências bibliográficas

- Boeri, C. N. (2012). *Secagem Convectiva de Produtos Alimentares: Optimização e Controlo*. Universidade de Aveiro.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. (Oxford, Ed.) (Second., p. 52).
- Incropera et al., data. *Fundamentos de transferencia de calor e massa*. (LTC, Ed.).
- Land, C.M. van't, 1937- *Drying in the process industry* / C.M. van't Land.
- Langrish, T. A. G. (2008). Characteristic drying curves for cellulosic fibres, Received 26 June 2007; accepted 3 July 2007
- Lu, T., & Shen, S. Q. (2007). Numerical and experimental investigation of paper drying : Heat and mass transfer with phase change in porous media, Received 17 August 2006; accepted 12 November 2006 Available online 12 January 2007
- Massoquete, A., & Committee, E. (2005). STUDY OF ANISOTROPIC MOISTURE DIFFUSION IN PAPER MATERIAL. College of Environmental Science and Forestry Syracuse, New York October 2005
- Pimentel de Oliveira, P. *Fundamentos de tramodinâmica Aplicada* (Lidel.).
- Sevda, M. S., & Rathore, N. S. (2010). Performance evaluation of the semicylindrical solar tunnel dryer for drying handmade paper, Received 10 August 2009; accepted 11 January 2010; published online 27 January 2010
- Vieira, M. G. A., & Rocha, S. C. S. (2007). Drying conditions influence on physical properties of recycled paper, Received 11 April 2006; received in revised form 18 June 2007; accepted 18 June 2007 Available online 29 June 2007
- Zhu, A., & Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, 318 Liuhe Road, Hangzhou 310023, Zhejiang Province, PR China article





# Anexos

## Anexo A- Condições no interior da estação de secagem



## A.1 Condições no interior da estação de secagem (1º Papel Branco).

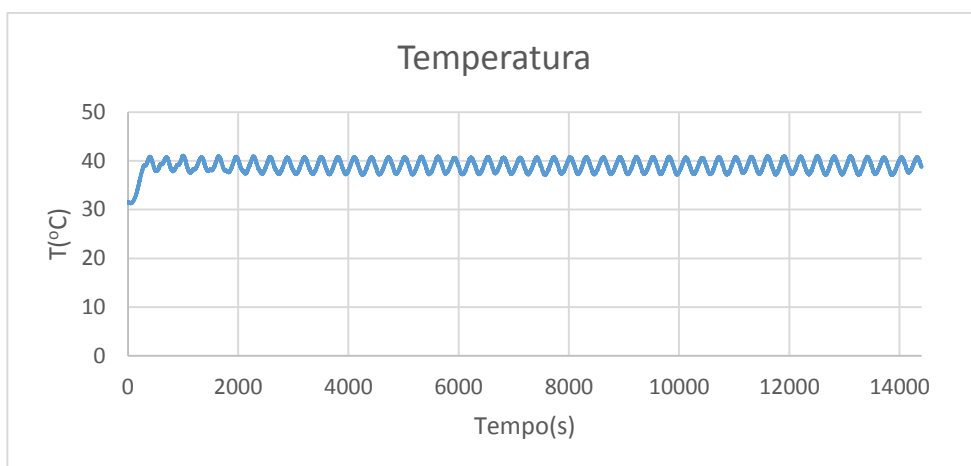
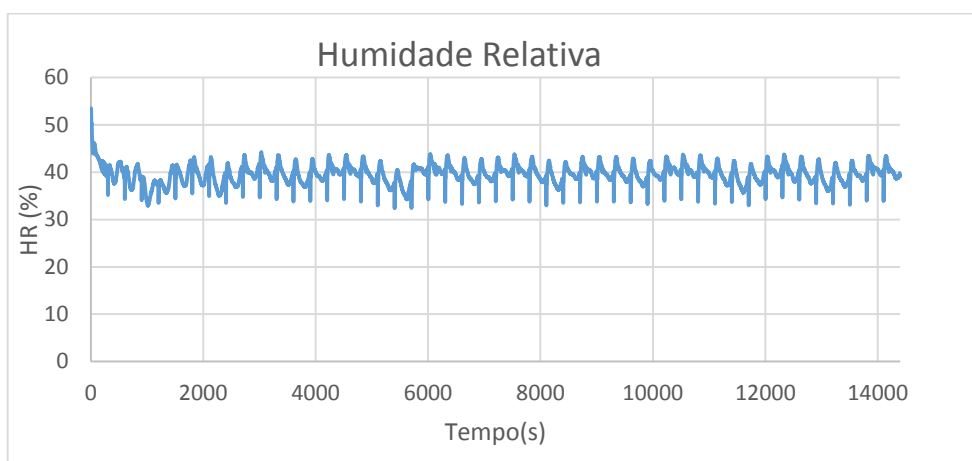
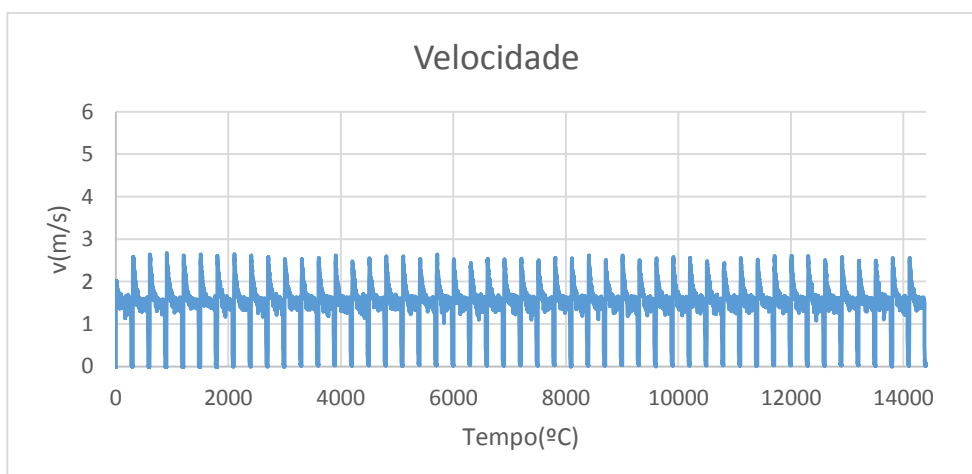
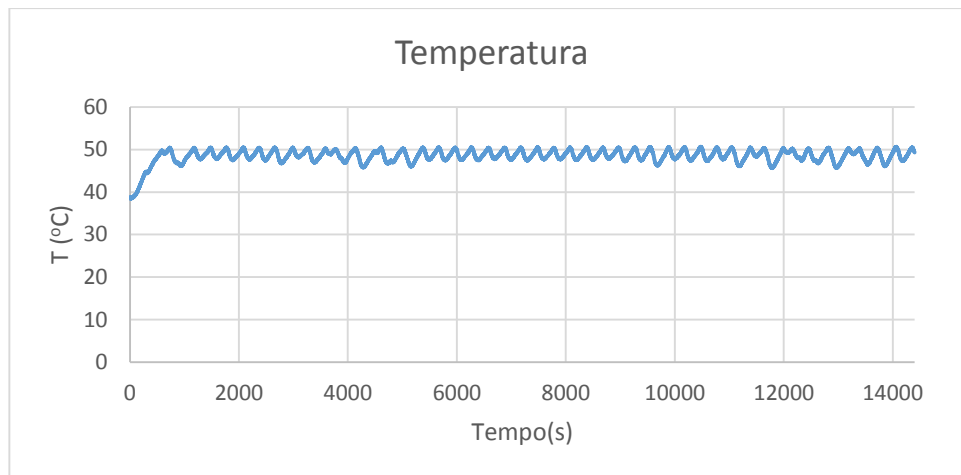
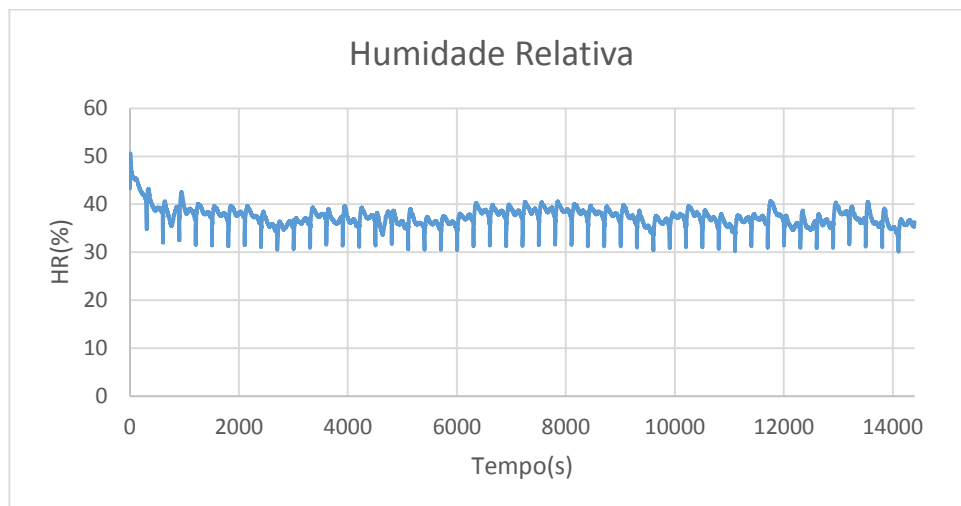
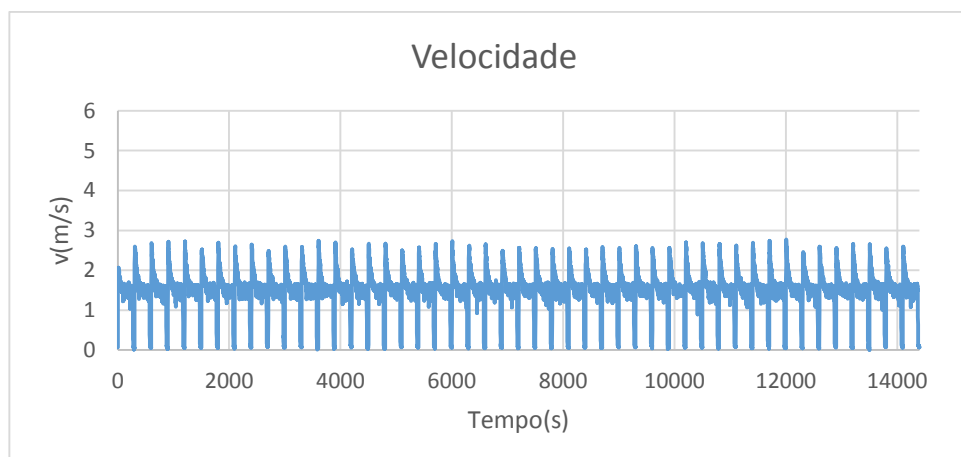
Figura A.0.1 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=40^{\circ}\text{C}$ Figura A.0.2 Variação da Humidade Relativa ao longo da secagem  $HR=40\%$ 

Figura A.0.3 Variação da Velocidade do ar ao longo da secagem 1.5 m/s

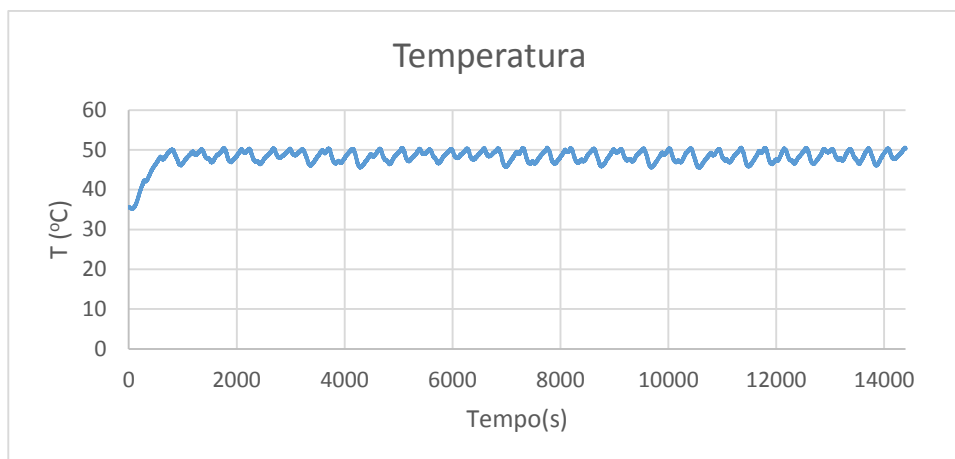
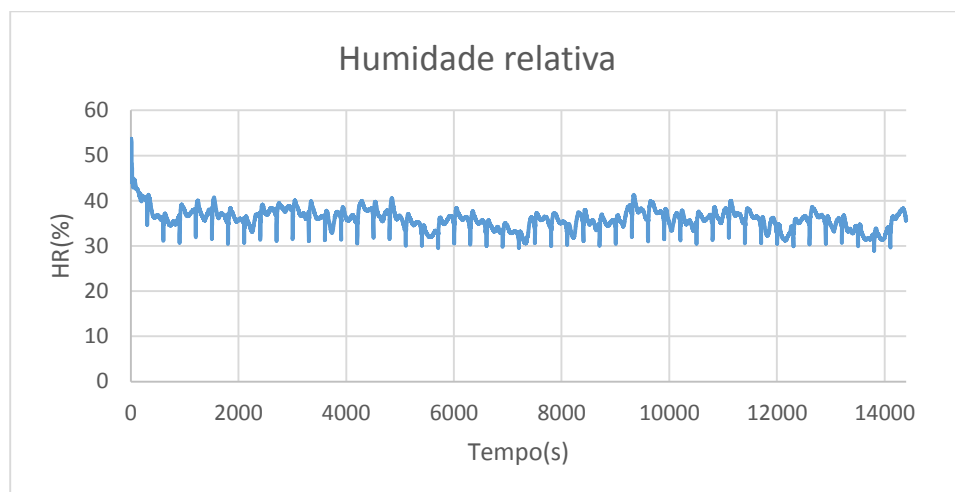
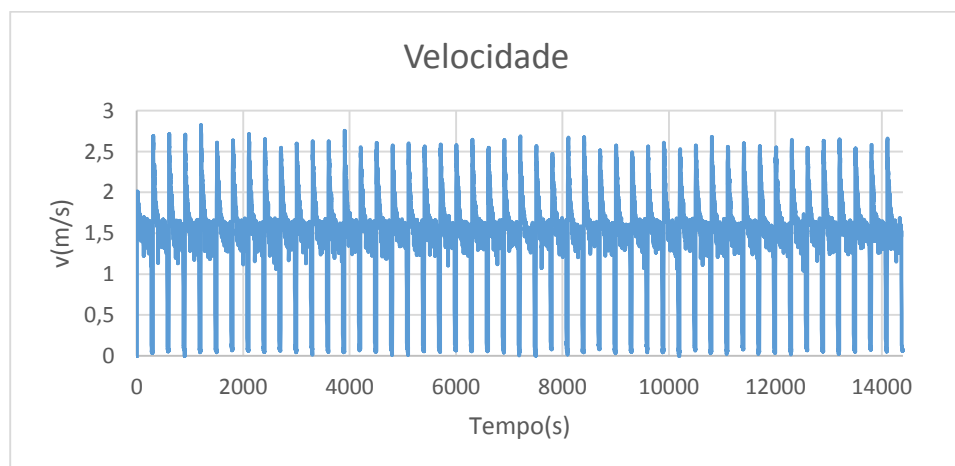


## A.2 Condições no interior da estação de secagem (2º Papel Branco).

Figura A.4 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=50^{\circ}$ Figura A.0.4 Variação da Humidade Relativa ao longo da secagem  $HR=47\%$ Figura A.0.5 Variação da Velocidade do ar ao longo da secagem  $v=1.5\text{ m/s}$

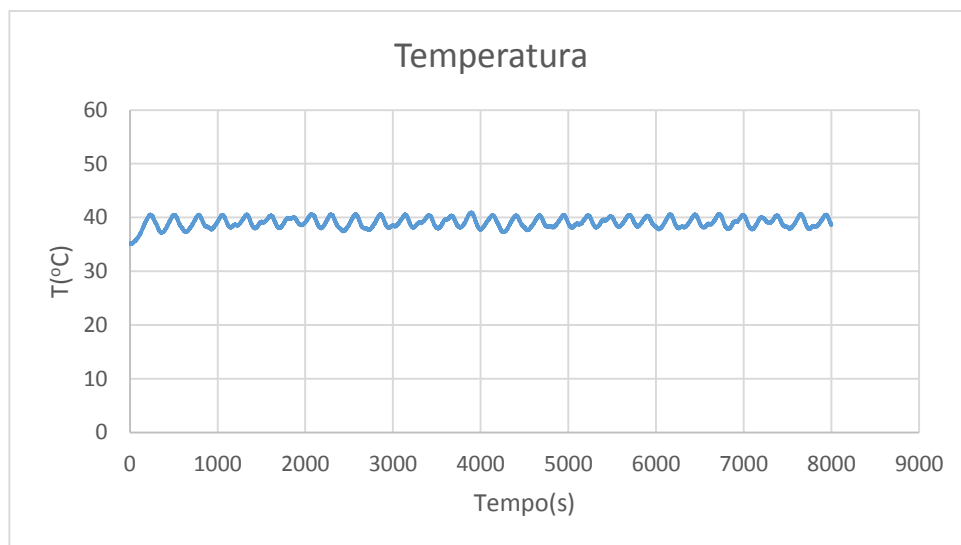
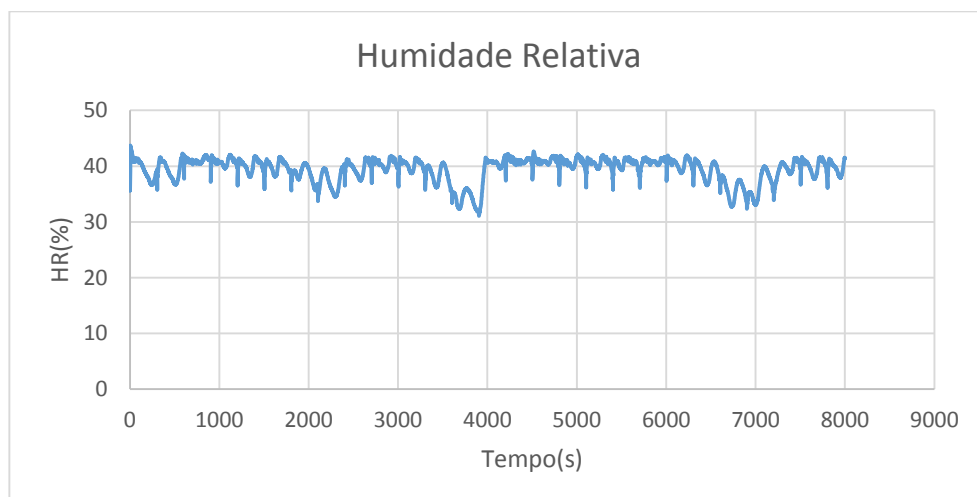
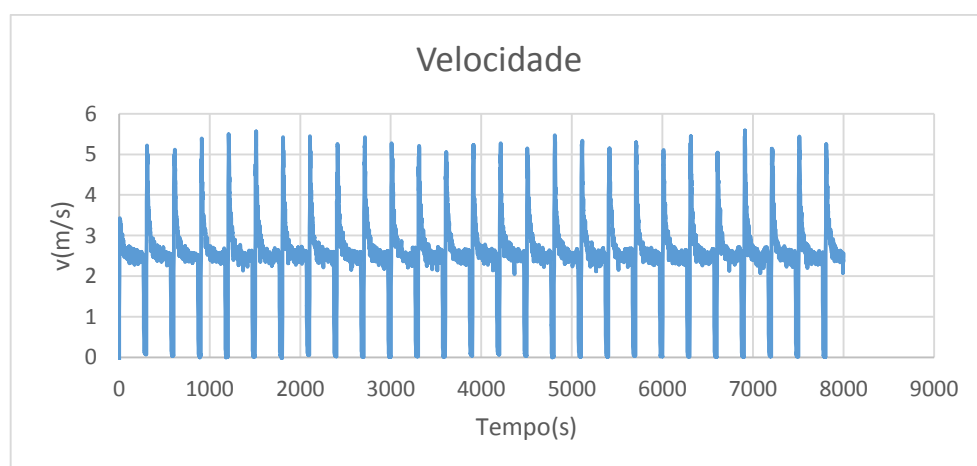


## A.3 Condições no interior da estação de secagem (3º Papel Branco).

Figura A.0.6 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=50^{\circ}$ Figura A.0.7 Variação da Humidade Relativa ao longo do tempo  $HR=40\%$ Figura A.0.8 Variação da velocidade do ar ao longo do tempo  $v=1.5\text{m/s}$



## A.4 Condições no interior da estação de secagem (4º Papel Branco).

Figura A.0.9 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=50^\circ$ Figura A.0.10 Variação da humidade relativa ao longo da secagem  $HR=40\%$ Figura A.0.11 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem  $v=2.5\text{m/s}$



## A.5 Condições no interior da estação de secagem (5º Papel Branco).

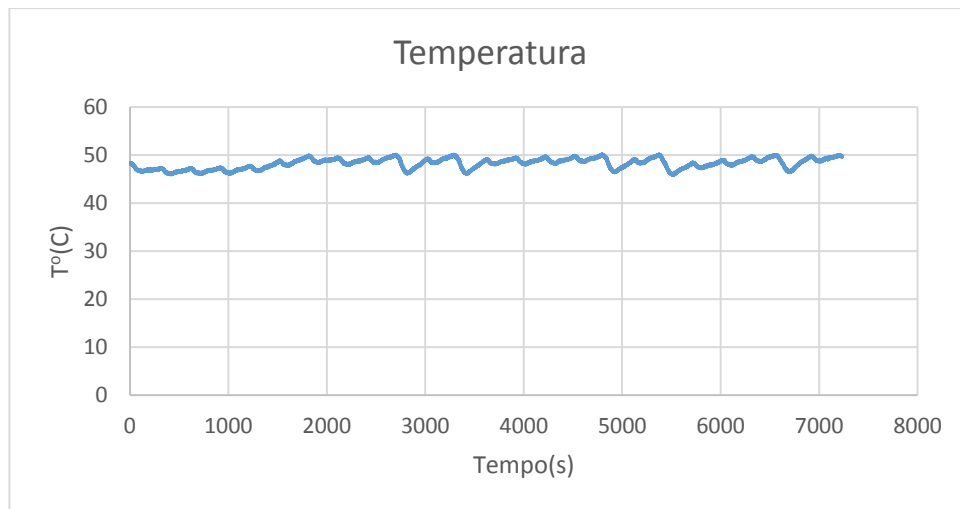


Figura A.0.12 Variação da Temperatura ao longo da secagem T=50°C

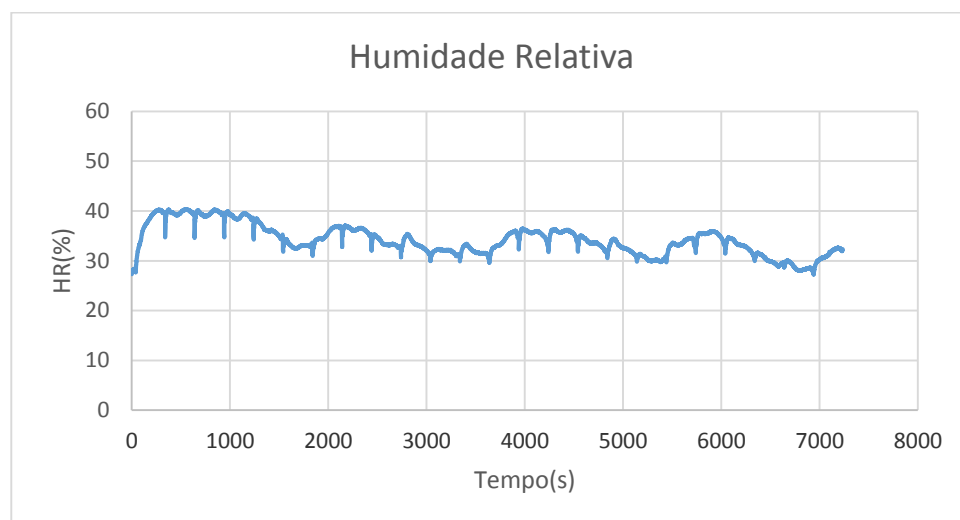


Figura A.0.13 Variação da humidade relativa ao longo da secagem HR=40%

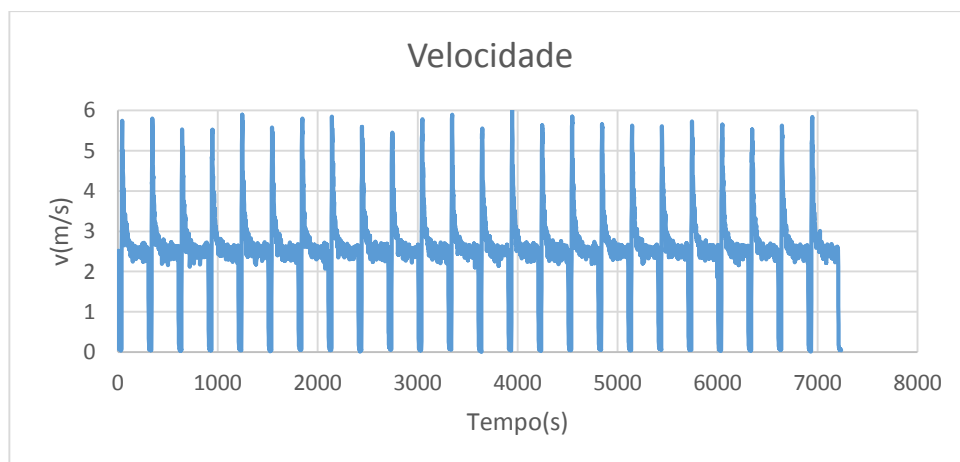
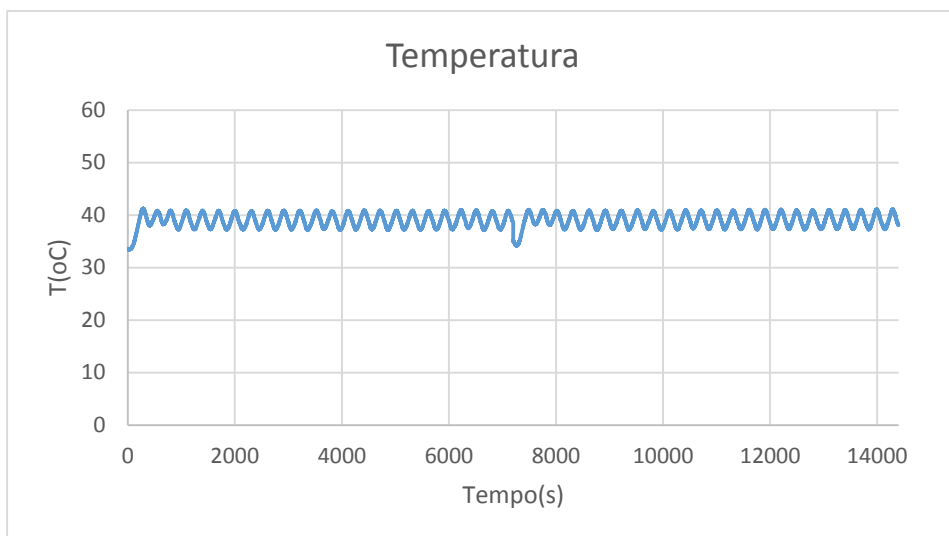
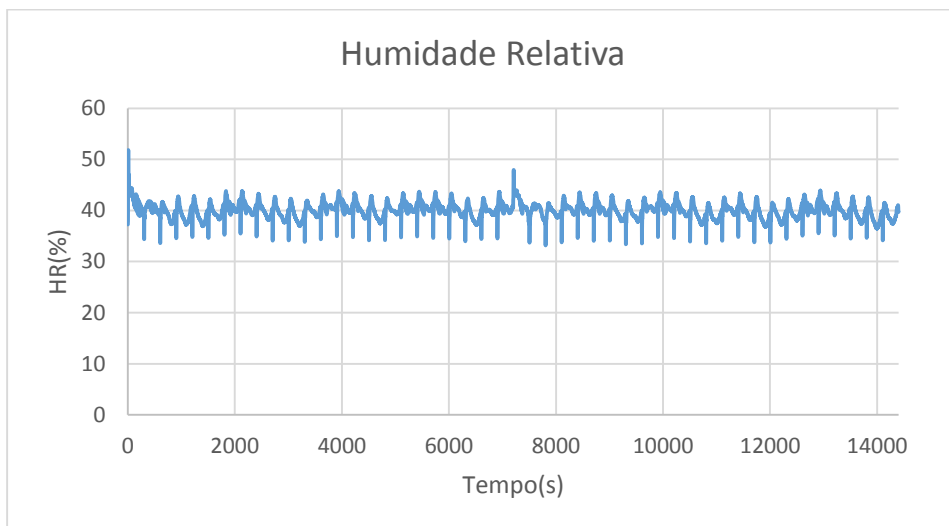
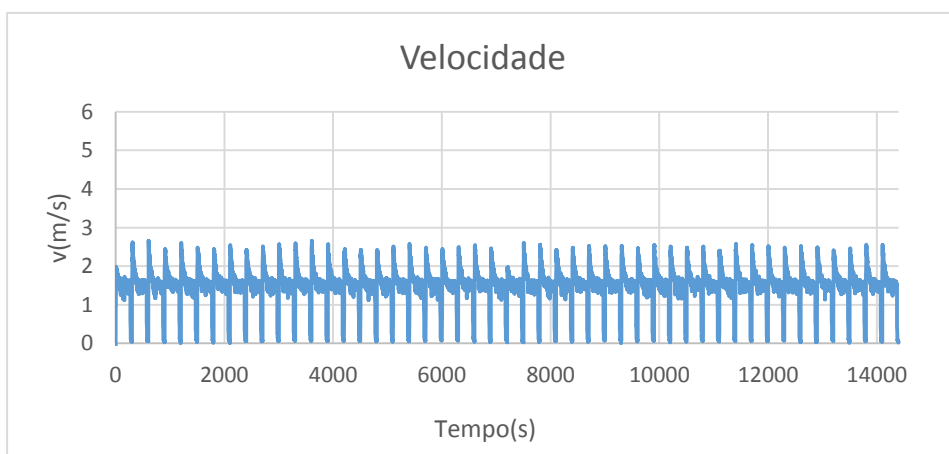


Figura A.0.14 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem v=2.5 m/s



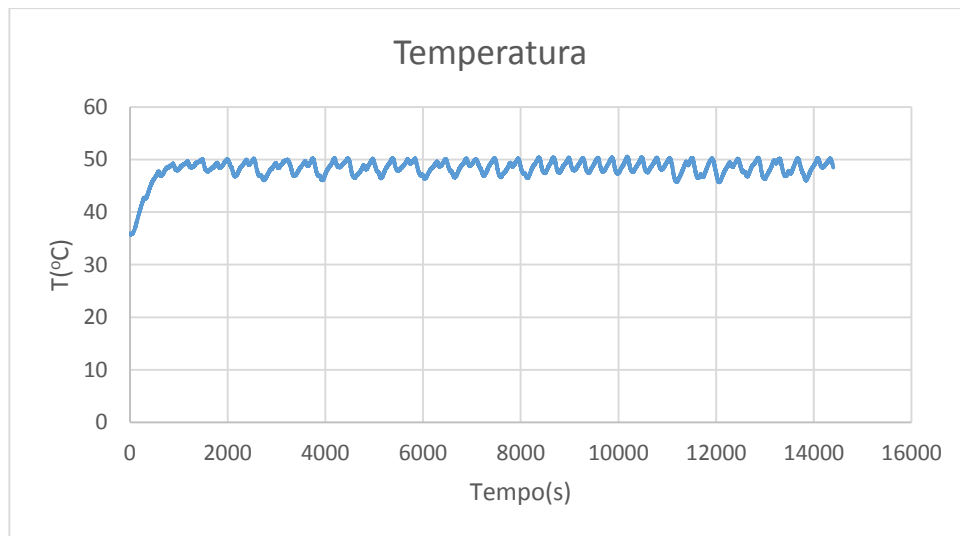
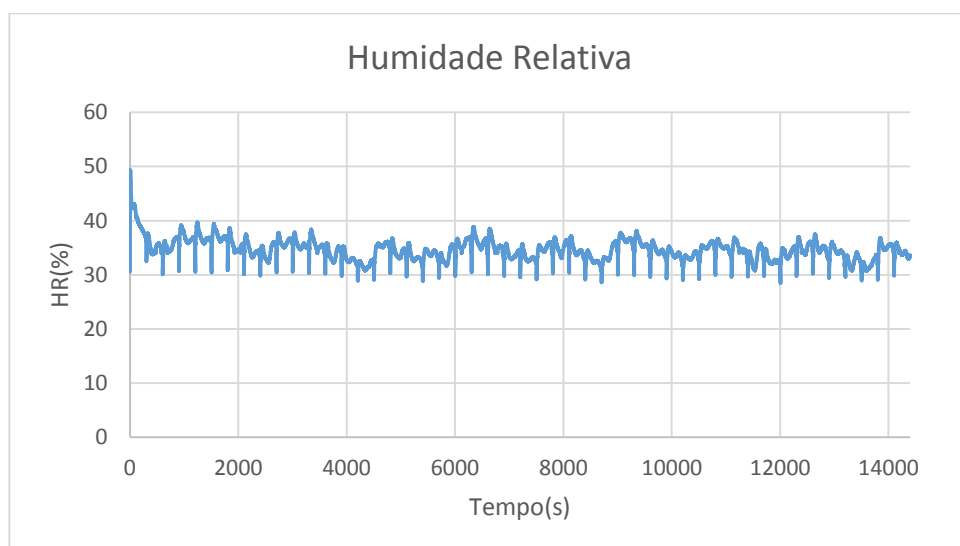
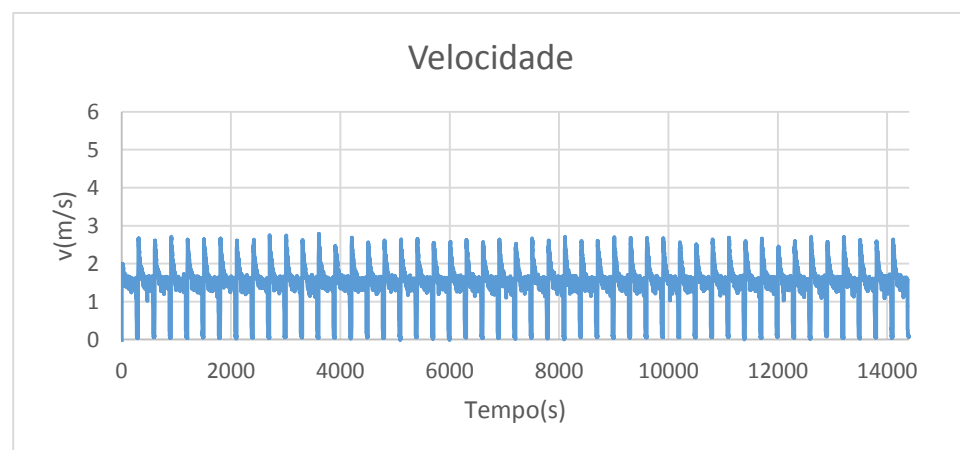
## A.6 Condições no interior da estação de secagem (1º Papel de cor espesso).

Figura A.0.15 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem  $T=40^{\circ}\text{C}$ Figura A.0.16 Variação da humidade relativa ao longo da secagem  $HR=40\%$ Figura A.0.17 Variação da velocidade ao longo da secagem  $v=1.5\text{m/s}$



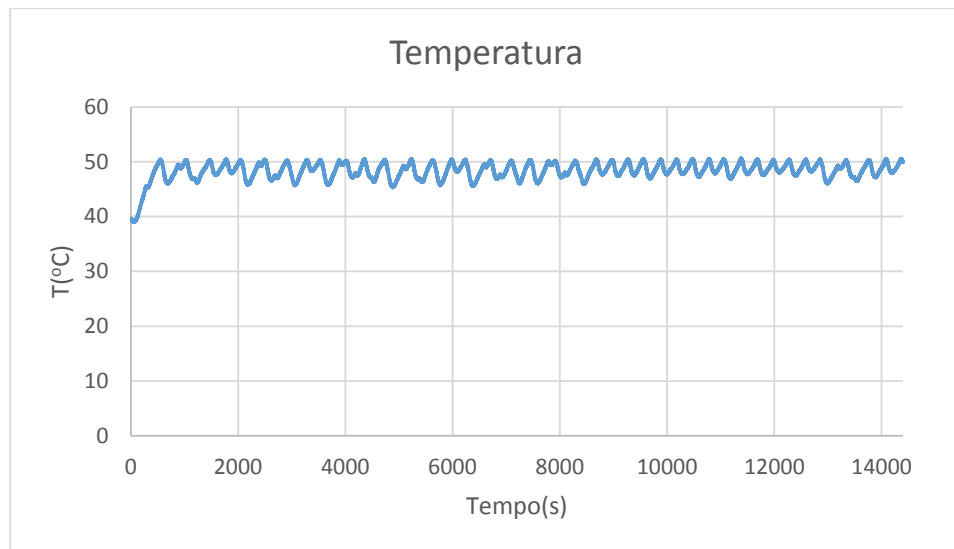
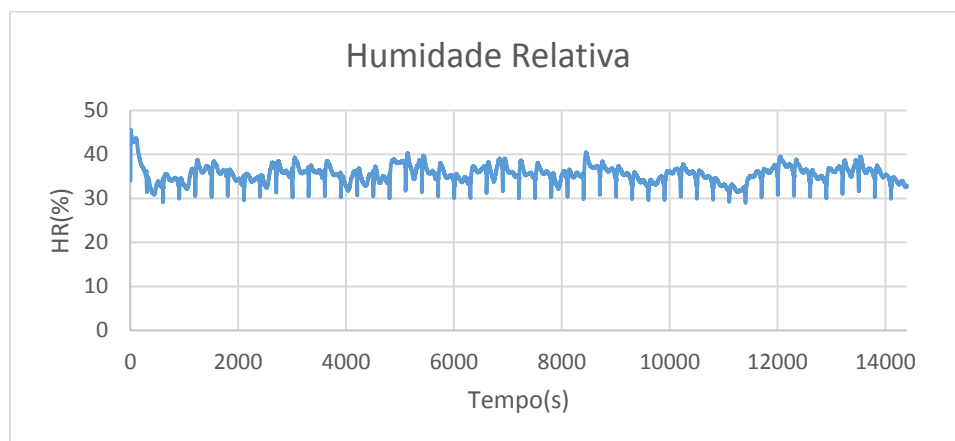
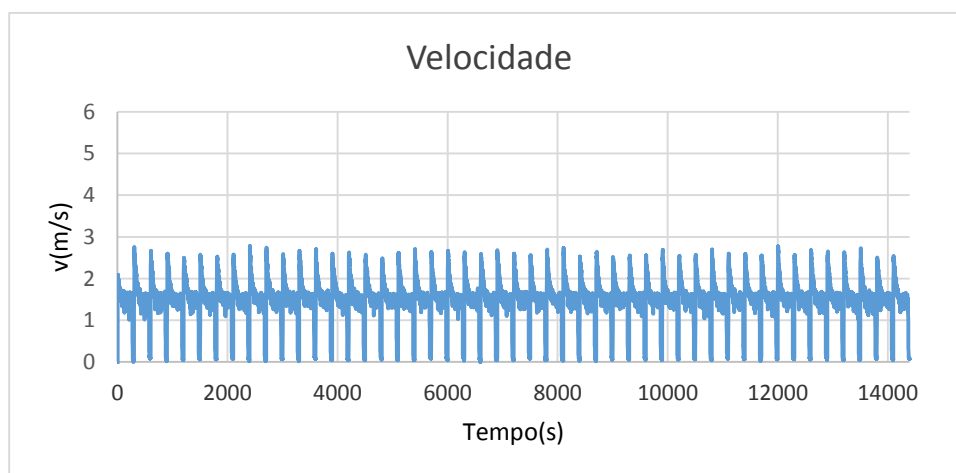


## A.7 Condições no interior da estação de secagem (2º Papel de cor espesso).

Figura A.0.18 Variação da velocidade ao longo da secagem  $T=50^{\circ}\text{C}$ Figura A.0.19 Variação da humidade relativa ao longo da secagem  $HR=40\%$ Figura A.0.20 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem  $v=1.5\text{ m/s}$



## A.8 Condições no interior da estação de secagem (3º Papel de cor espesso).

Figura A.0.21 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=50^{\circ}\text{C}$ Figura A.0.22 Variação da humidade relativa ao longo da secagem  $HR=50\%$ Figura A.0.23 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem  $1.5\text{m/s}$



## A.9 Condições no interior da estação de secagem (1º Papel de cor fino).

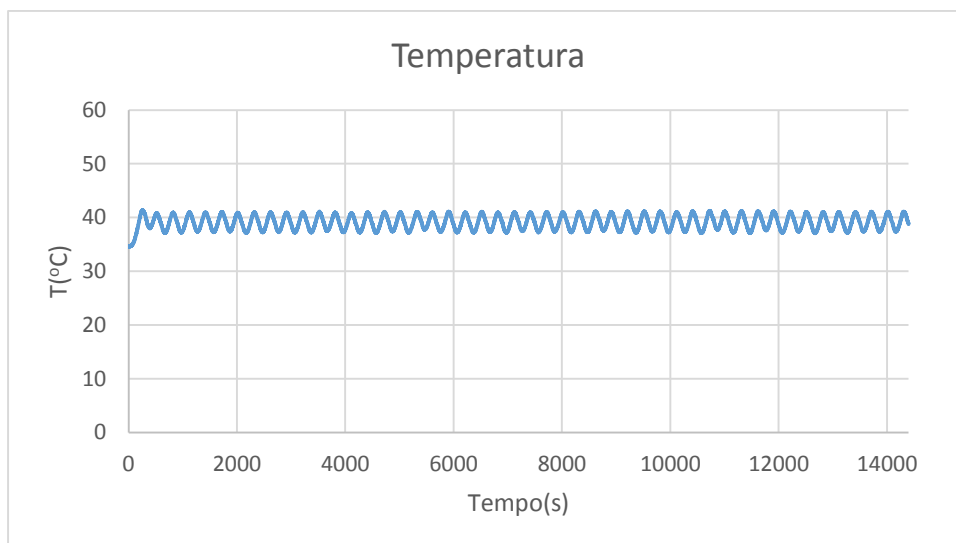


Figura A.0.24 Variação da Temperatura ao longo da secagem 40°C

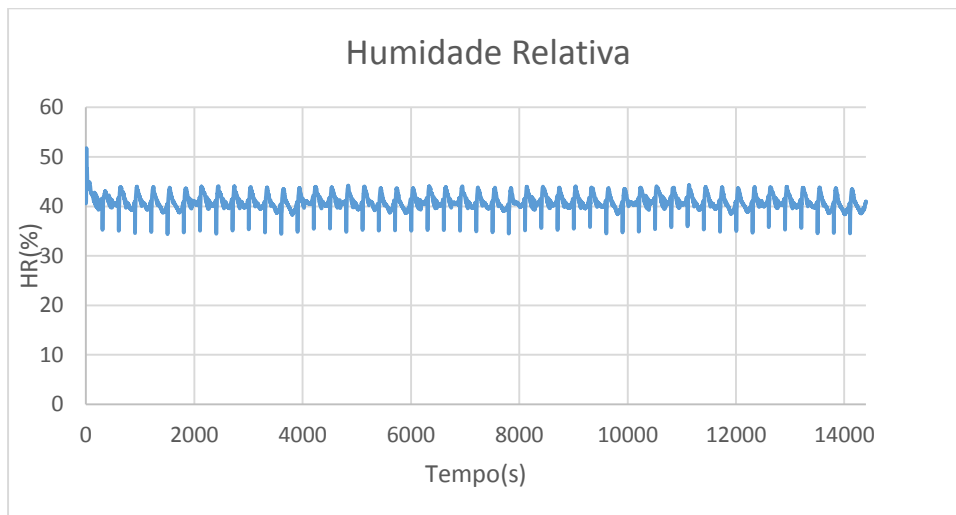


Figura A.0.25 Variação da humidade relativa ao longo da secagem HR=40%

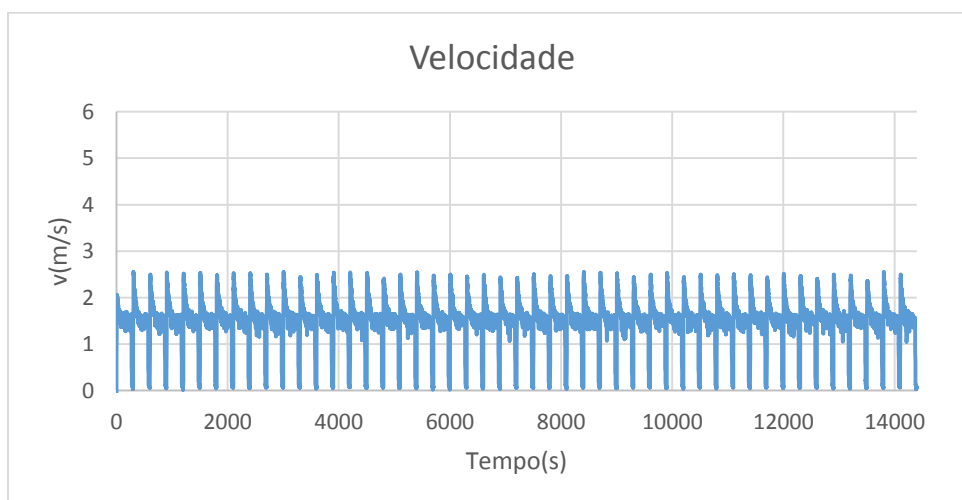


Figura A.0.26 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem v=1.5m/s



## A.10 Condições no interior da estação de secagem (2º Papel de cor fino).

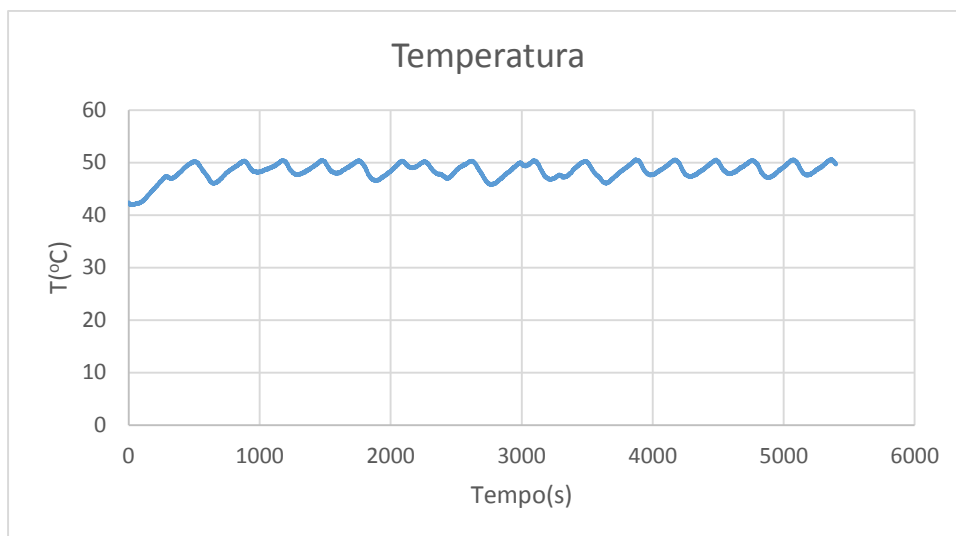


Figura A.0.27 Variação da temperatura ao longo da secagem 50°C

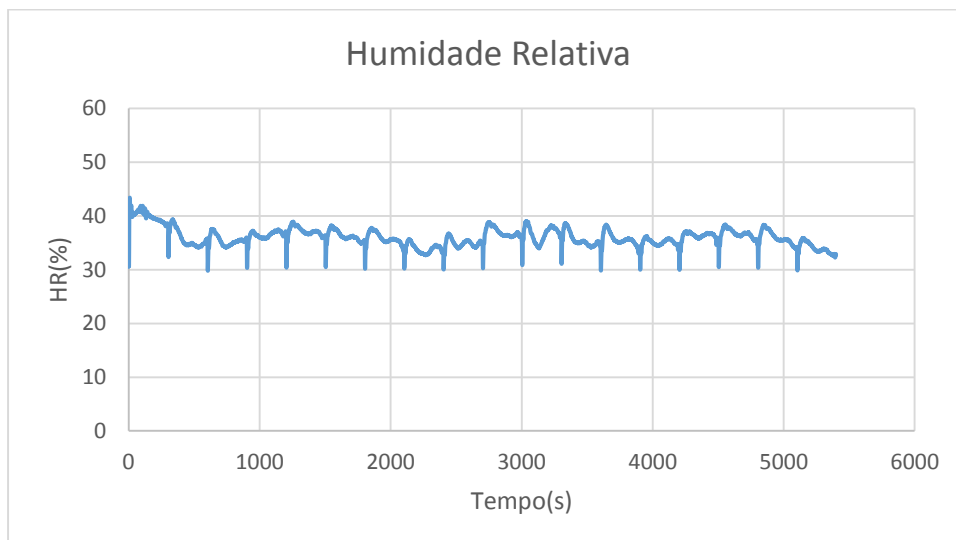


Figura A.0.28 Variação da humidade relativa ao longo da secagem HR=40%

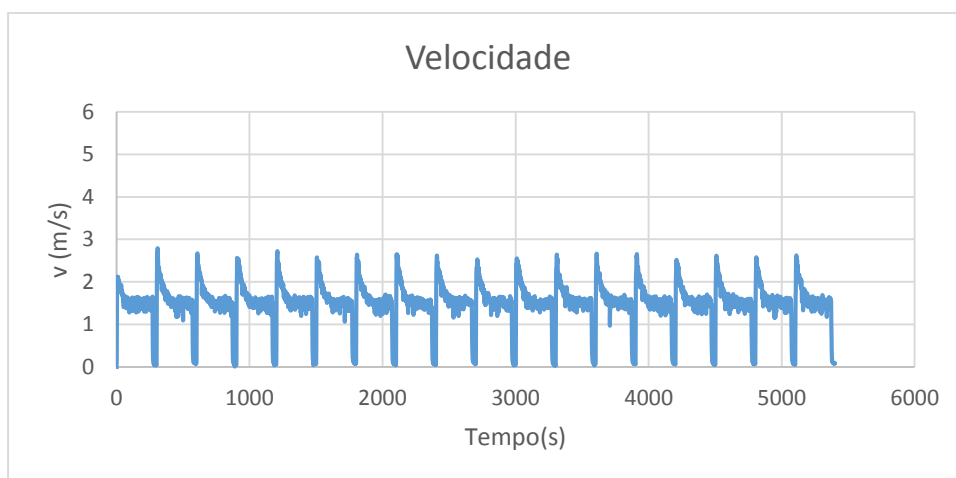


Figura A.0.29 Variação da velocidade ao longo da secagem v=1.5m/s



## A.11 Condições no interior da estação de secagem (3º Papel de cor fino).

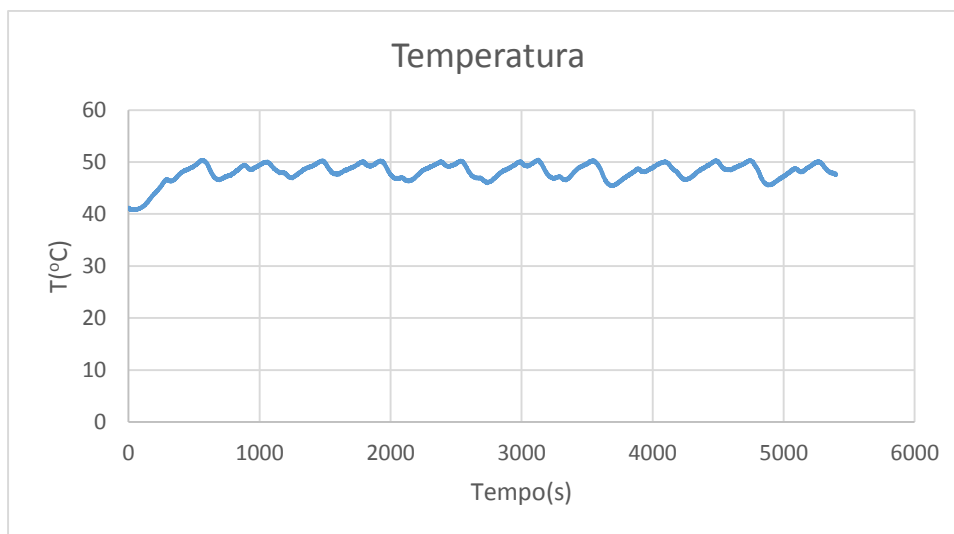


Figura A.0.30 Variação da temperatura ao longo da secagem 50° C

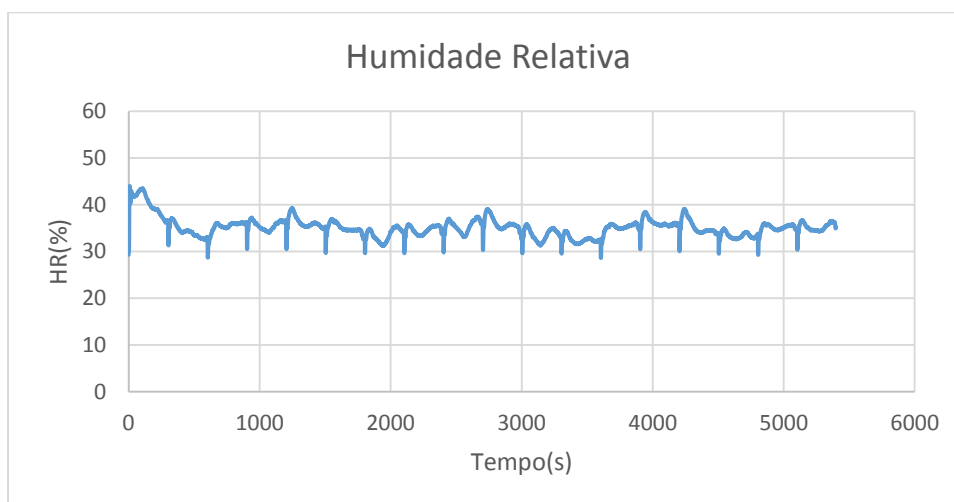


Figura A. 0.31 Variação da humidade relativa ao longo da secagem HR=50%

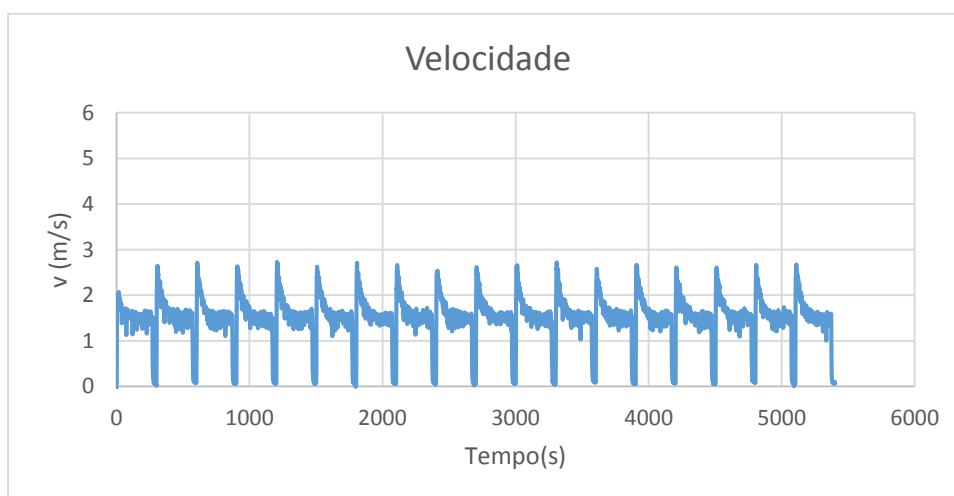
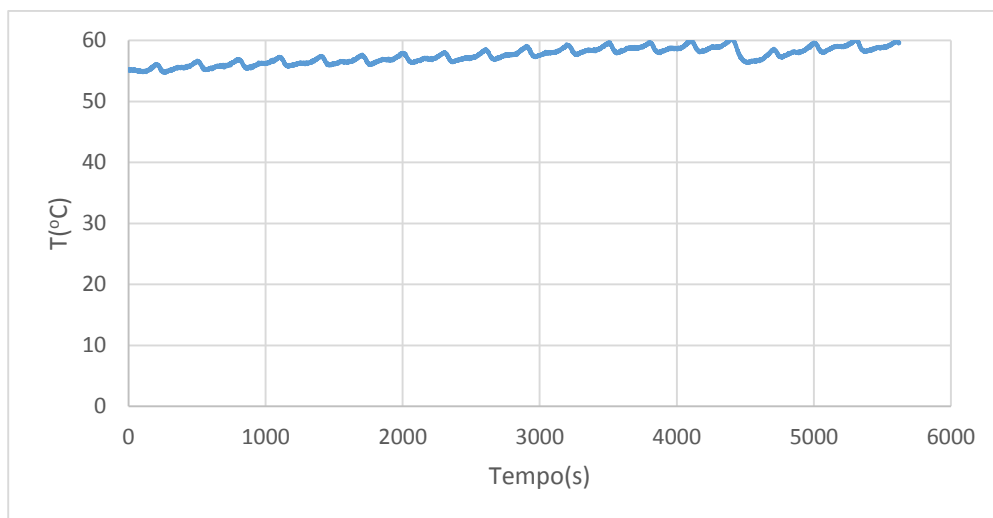
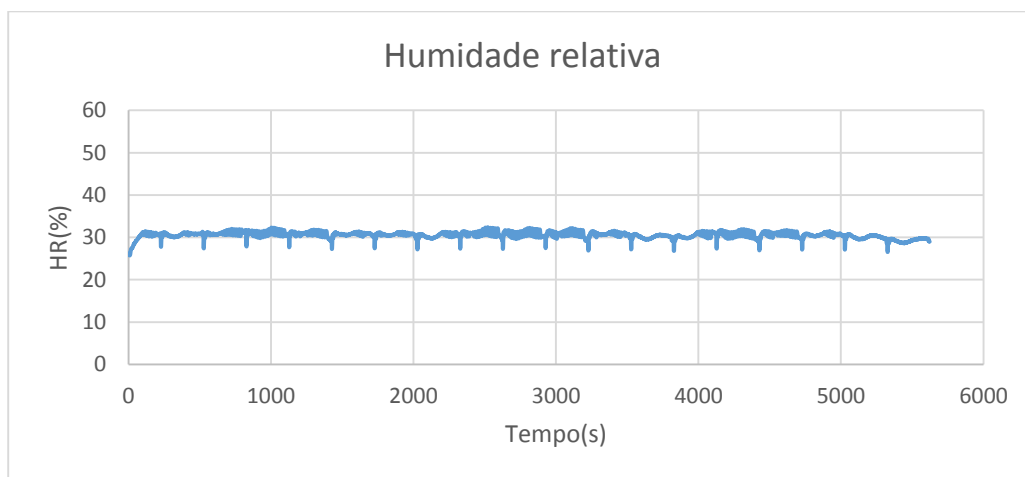
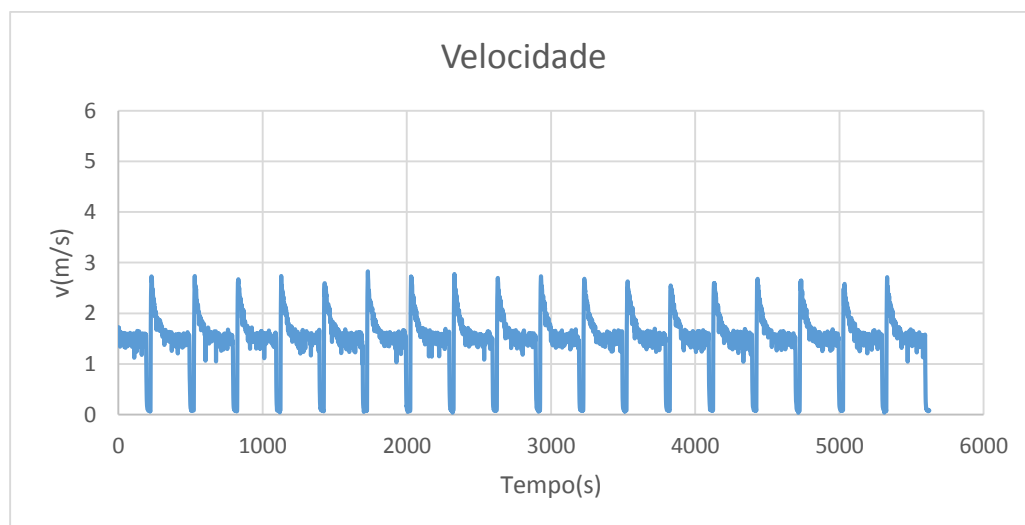


Figura A.0.32 Variação da velocidade do ar ao longo da secagem v=1.5 m/s



## A.12 Condições no interior da estação de secagem (4º Papel de cor fino).

Figura A.0.33 Variação da temperatura ao longo da secagem  $T=60^{\circ}$ Figura A.0.34 Variação da humidade relativa ao longo da secagem  $HR=30$ Figura A.0.35 Variação da velocidade ar ao longo da secagem  $v=1.5 \text{ m/s}$



## A.13 Condições no interior da estação de secagem (5º Papel de cor fino).

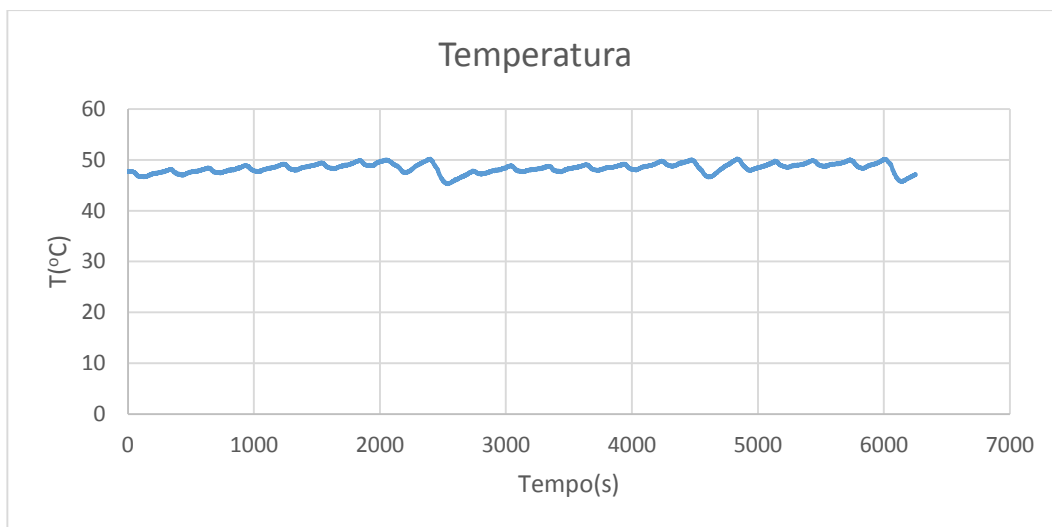


Figura A.0.36 Variação da temperatura ao longo da secagem 50°C

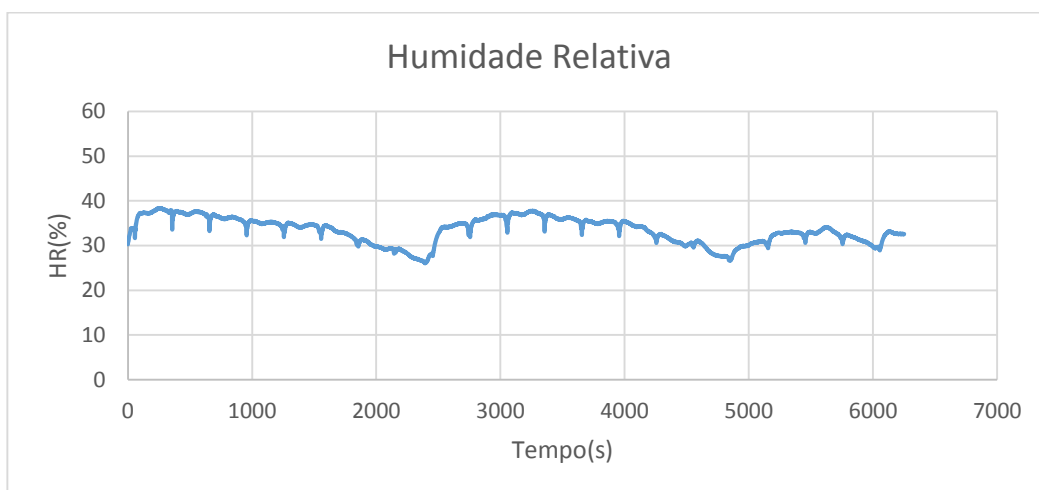


Figura A.0.37 Variação da humidade relativa ao longo da secagem HR=30%

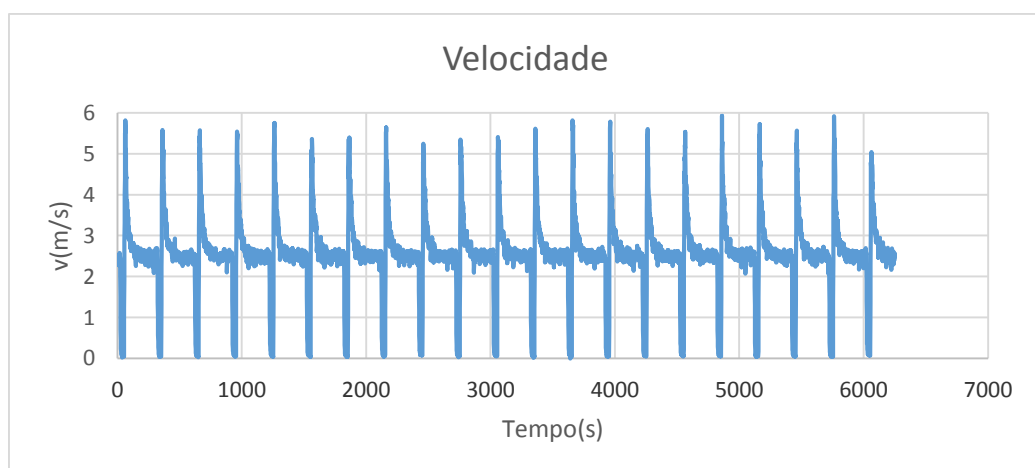


Figura A.0.38 Variação da velocidade do ao longo da secagem



## Anexo B-Variação da massa efetiva





## B.1 Variação da massa da amostra (1º Papel branco).

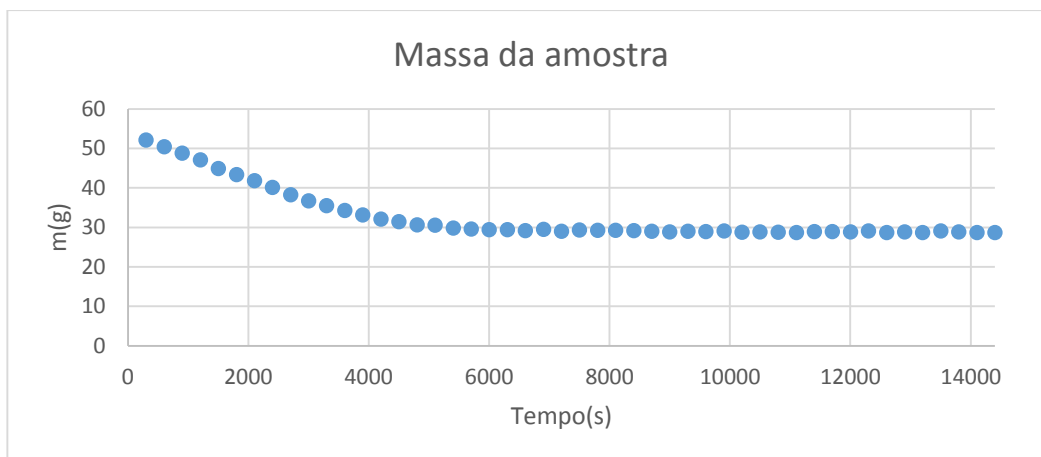


Figura B.1 Variação da massa da amostra

## B.2 Variação da massa da amostra (2º Papel branco).

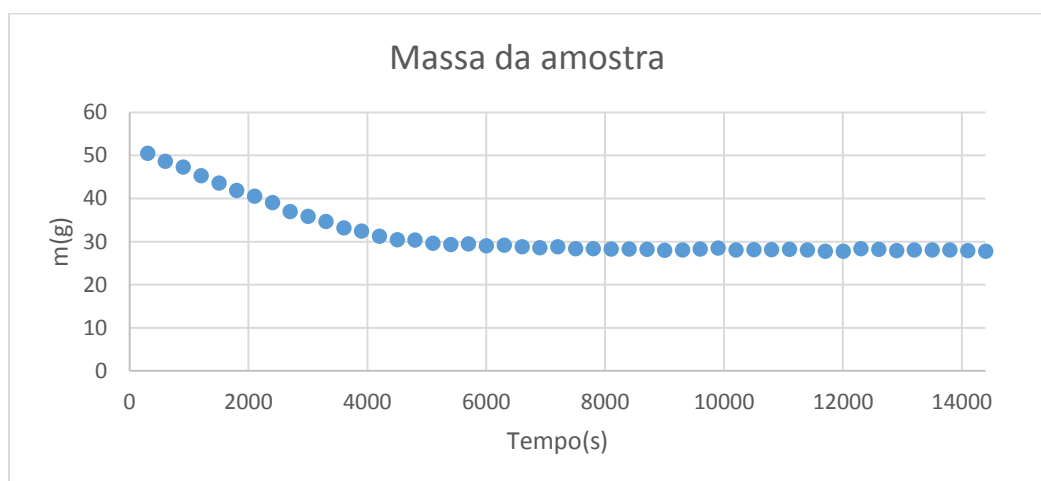


Figura B.2 Variação da massa da amostra

## B. Variação da massa da amostra (3º Papel branco).

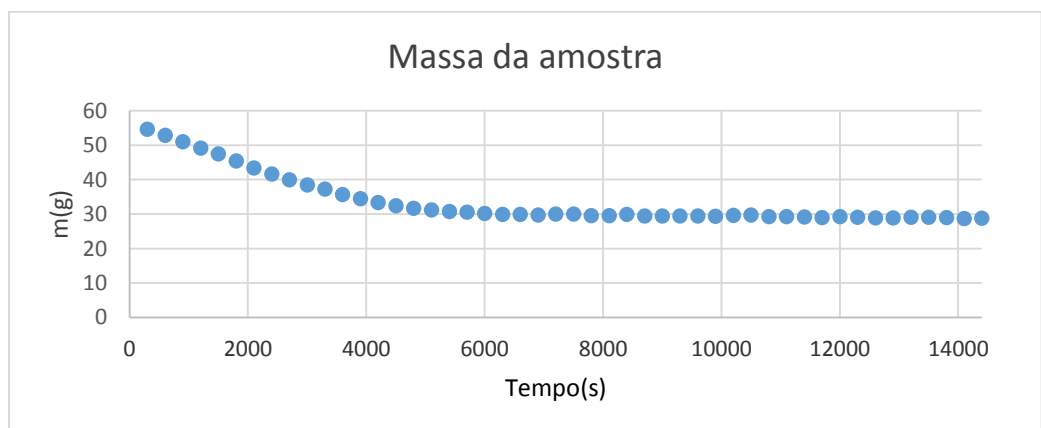


Figura B.3 Variação da massa da amostra



## B.4 Variação da massa da amostra (4º Papel branco).

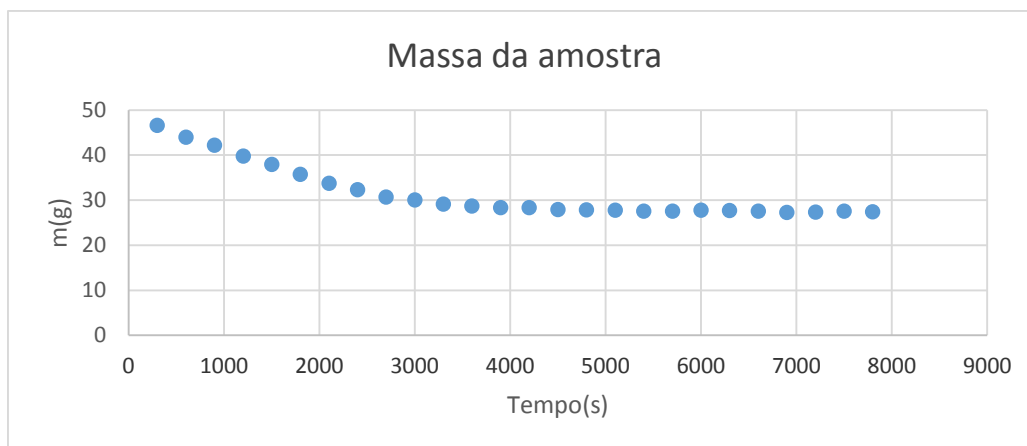


Figura B.4 Variação da massa da amostra

## B.5 Variação da massa da amostra (5º Papel branco).

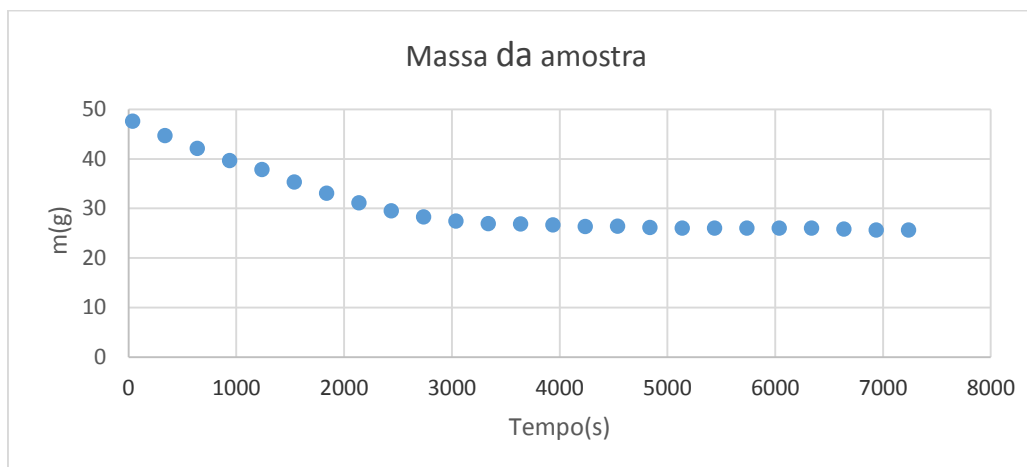


Figura B.5 Variação da massa da amostra

## B.6 Variação da massa da amostra (1º Papel de cor espesso).

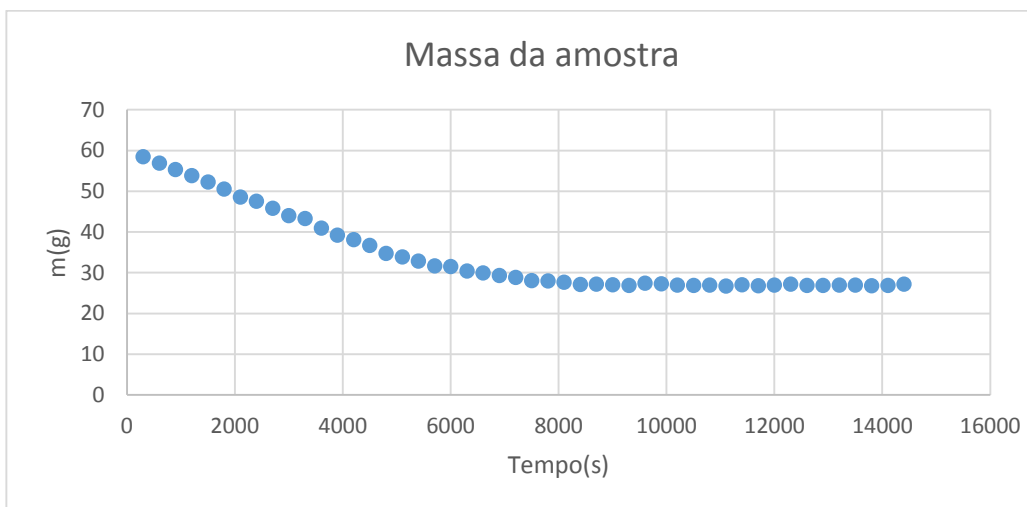


Figura B.6 Variação da massa da amostra



## B.7 Variação da massa da amostra (2º Papel de cor espesso).

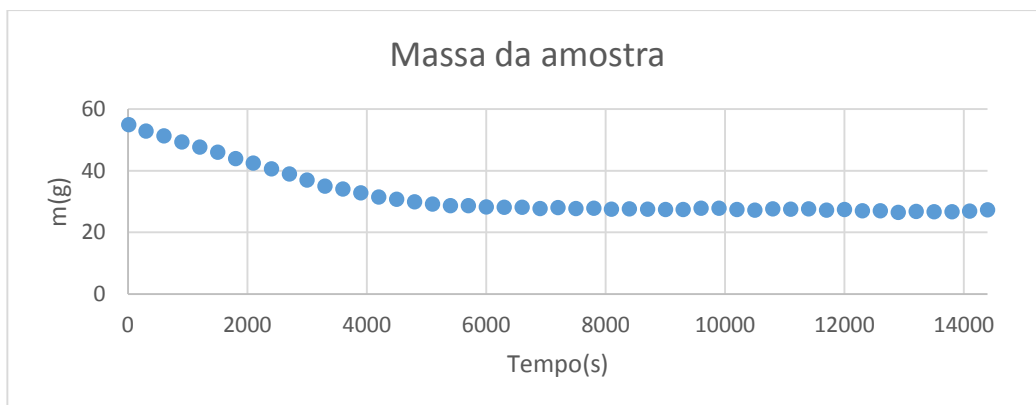


Figura B.7 Variação da massa da amostra

## B.8 Variação da massa da amostra (3º Papel de cor espesso).

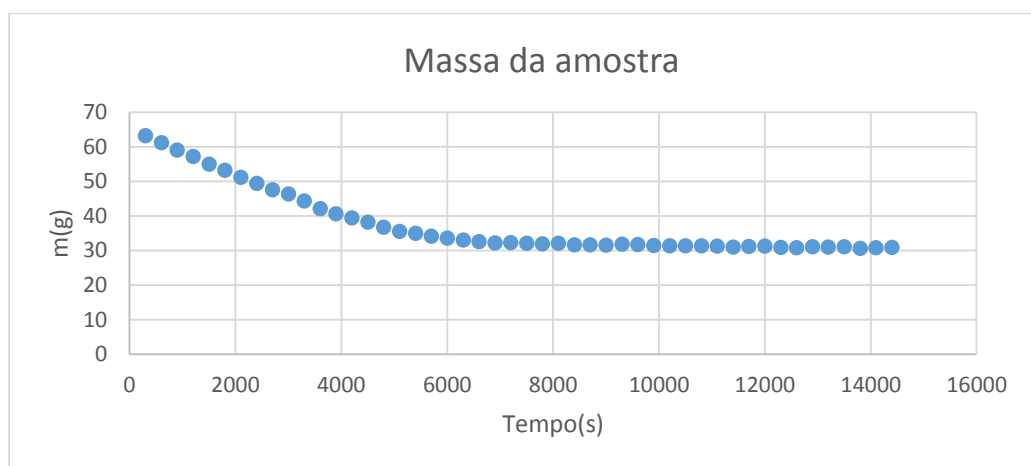


Figura B.8 Variação da massa da amostra

## B.9 Variação da massa da amostra (1º Papel de cor fino).

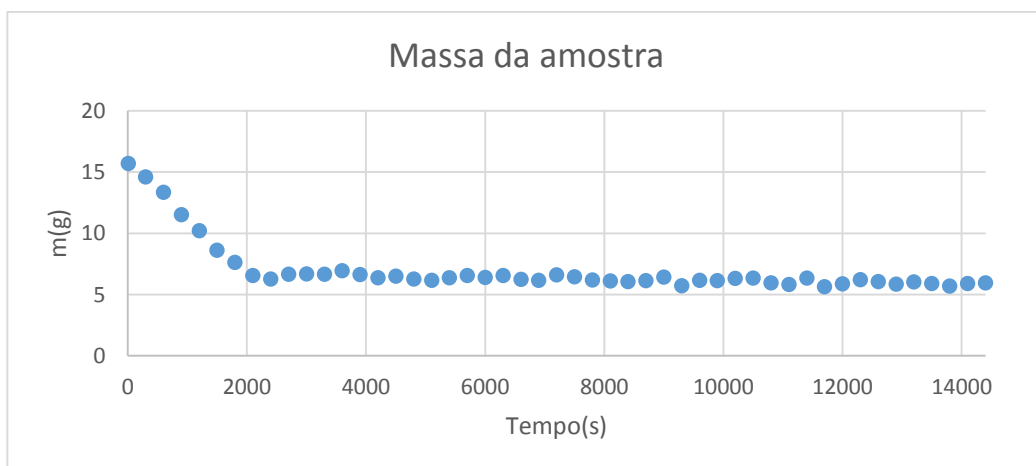


Figura B.9 Variação da massa da amostra



## B.10 Variação da massa da amostra (2º Papel de cor fino).

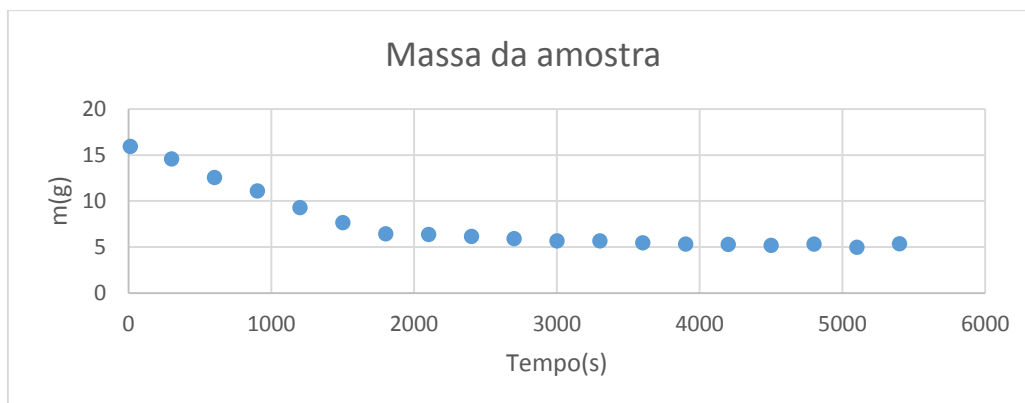


Figura B.10 Variação da massa da amostra

## B.11 Variação da massa de água na amostra (3º Papel de cor fino).

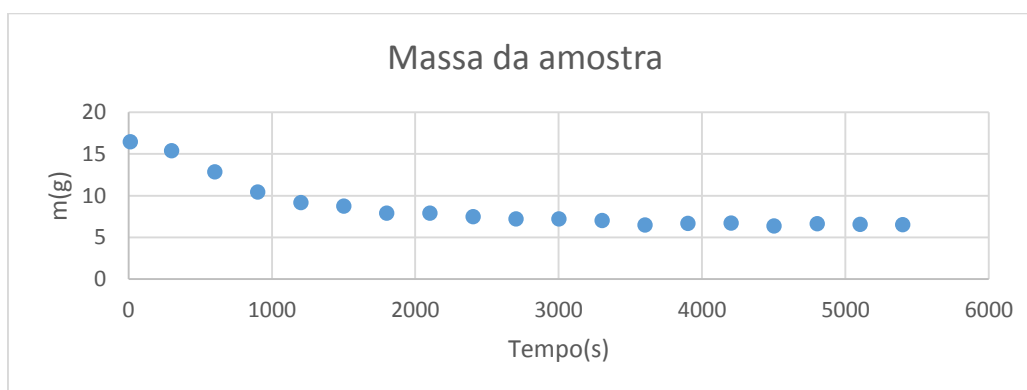


Figura B.11 Variação da massa da amostra

## B.12 Variação da massa da amostra (4º Papel de cor fino).

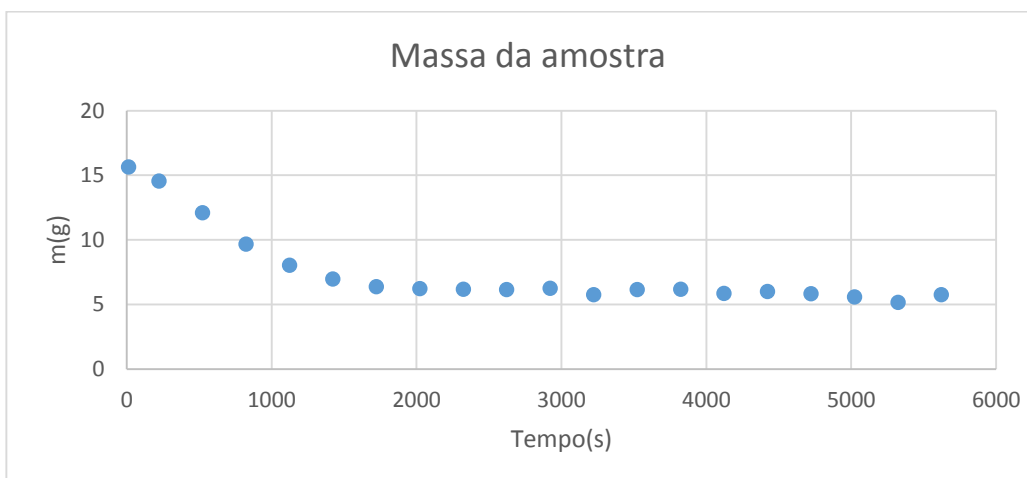
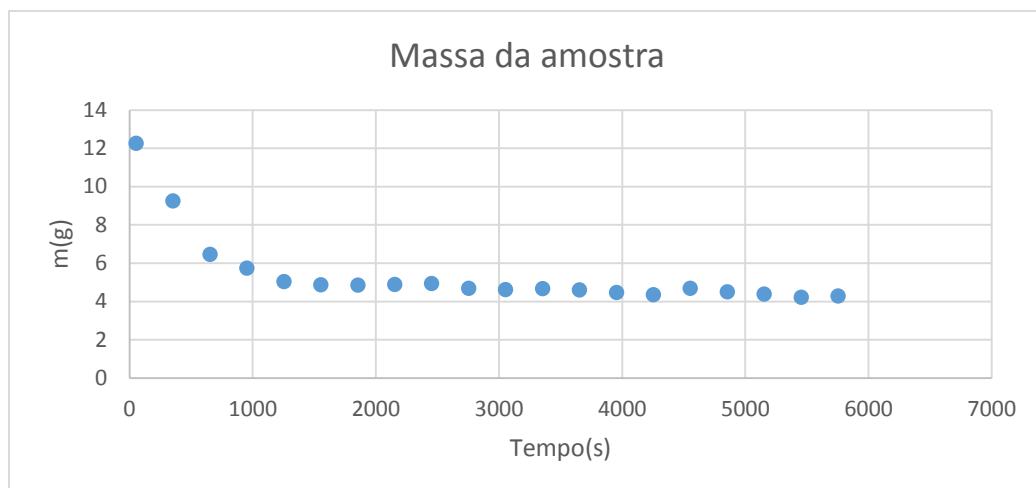


Figura B.14 Variação da massa da amostra

B.13 Variação da massa da amostra (5º Papel de cor fino).



*Figura B.13 Variação da massa da amostra*



## Anexo C- teor de água adimensional



## C.1 teor de água adimensional (Papel Branco).

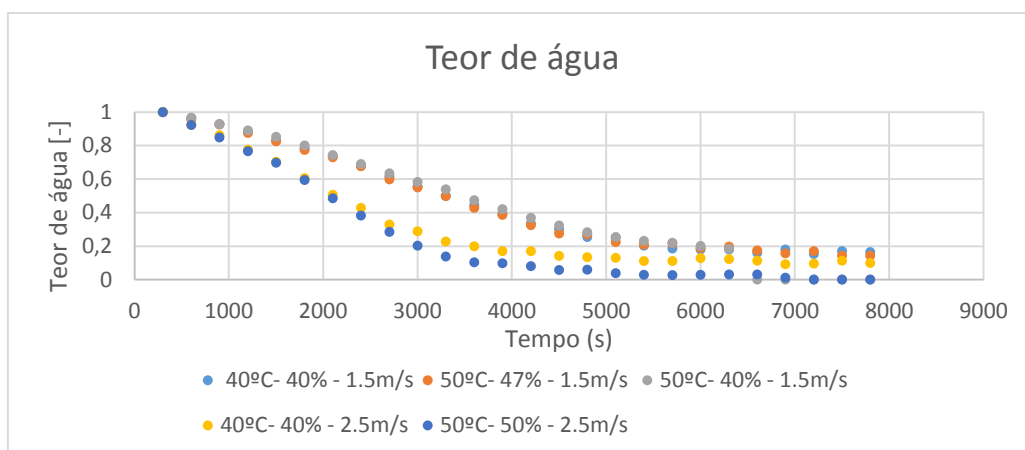


Figura C.1 Teor de água do papel branco

## C.2 teor de água adimensional (Papel de cor espesso).

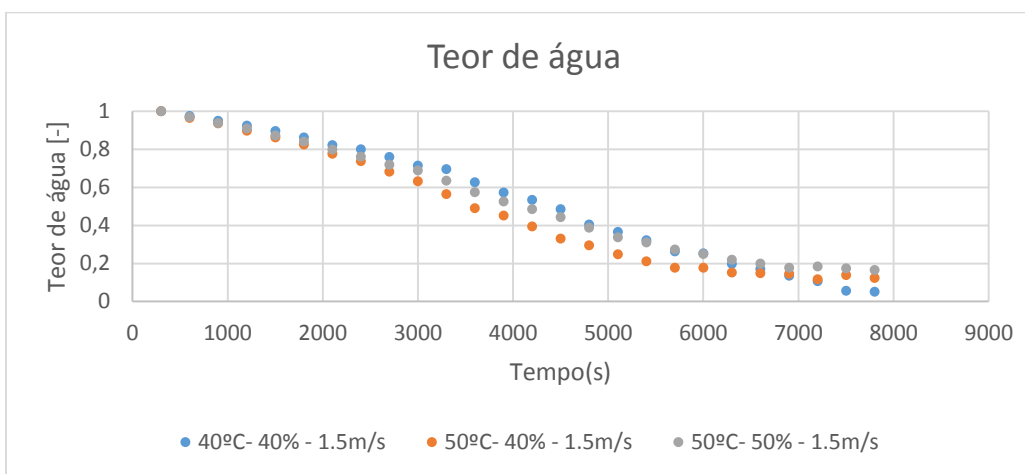


Figura C.2 Teor de água do papel de cor espesso

## C.3 teor de água adimensional (Papel de cor fino).

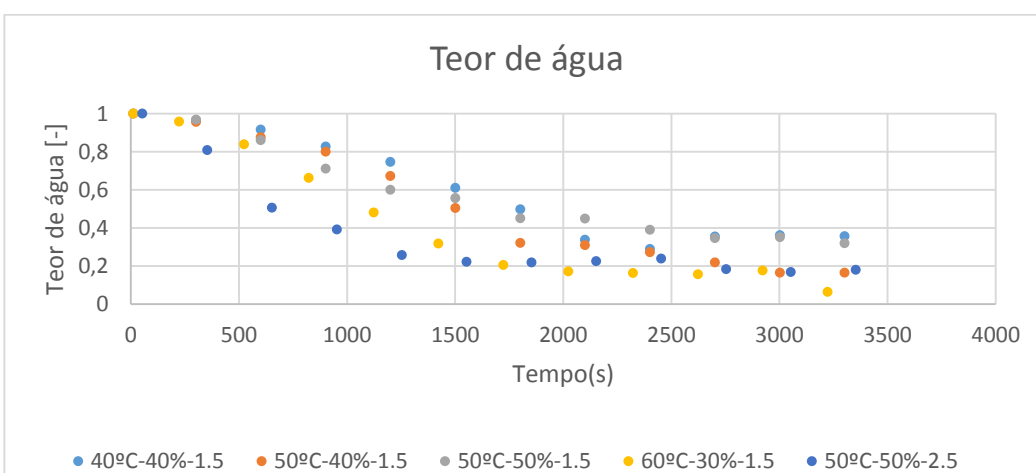


Figura C.3 Teor de água do papel de cor fino



## Anexo D-Taxa de secagem





## D.1 Taxa de secagem (Papel Branco)

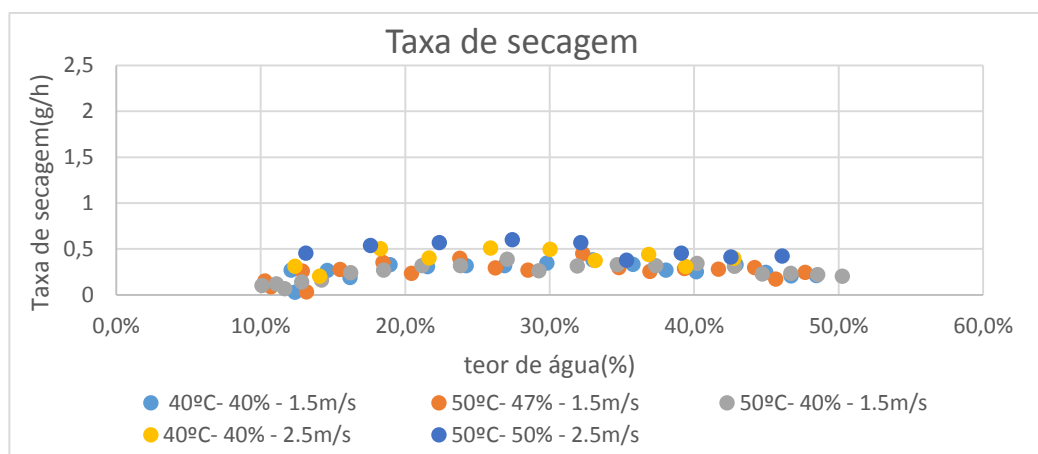


Figura D.1 Curvas da taxa de secagem para diferentes velocidades com papel branco

## D.2 Taxa de secagem (Papel de cor espesso)

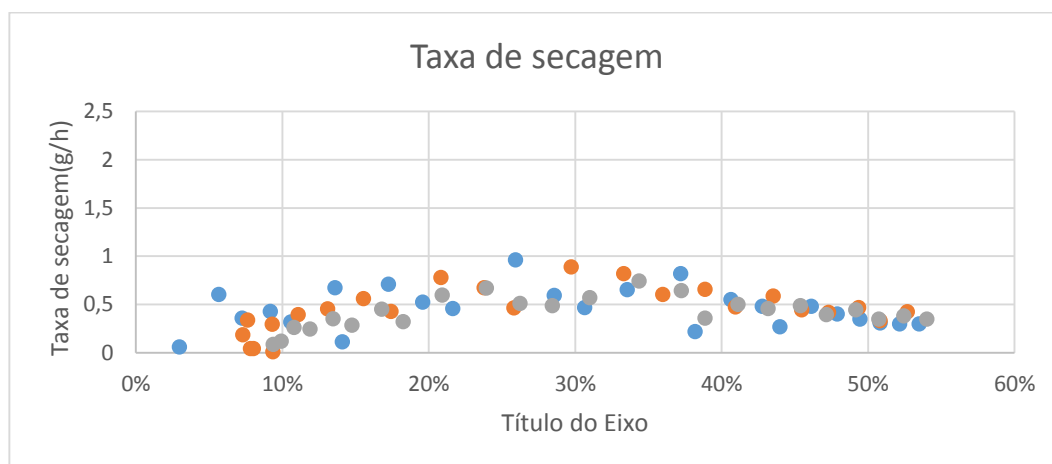


Figura D.2 Curvas da taxa de secagem para diferentes velocidades com papel de cor espesso

## D.3 Taxa de secagem (Papel de cor fino)

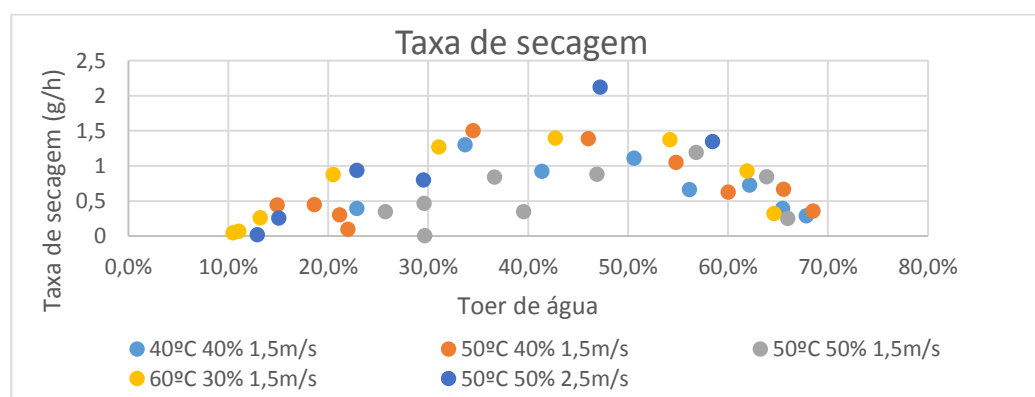


Figura D.3 Curvas da taxa de secagem para diferentes velocidades com papel de cor fino



## Anexo E Validação do modelo, resultados experimentais vs os resultados teóricos



## F.1 Resultados experimentais vs os resultados teóricos (2º Papel Branco)

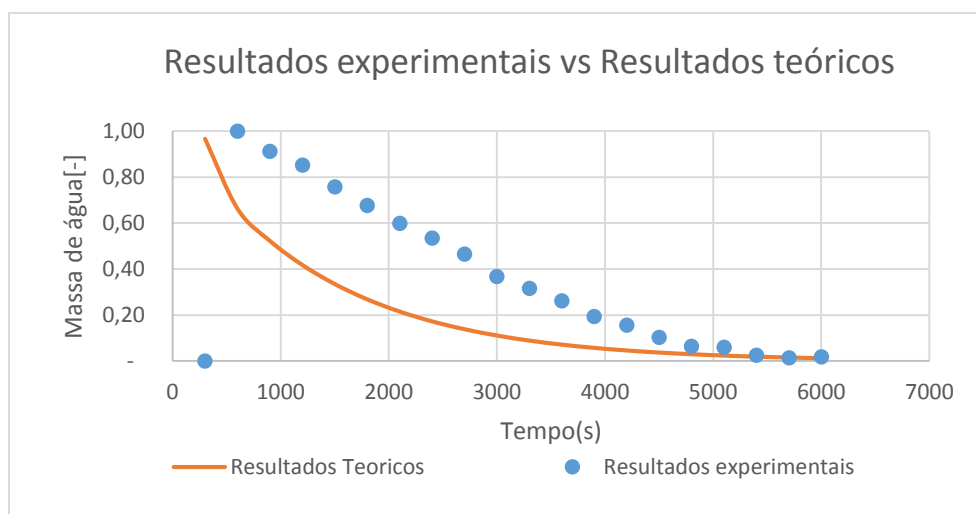


Figura F.1 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel Branco (50°C-47%-1,5m/s)

## F.2 Resultados experimentais vs resultados teóricos (3º Papel Branco)

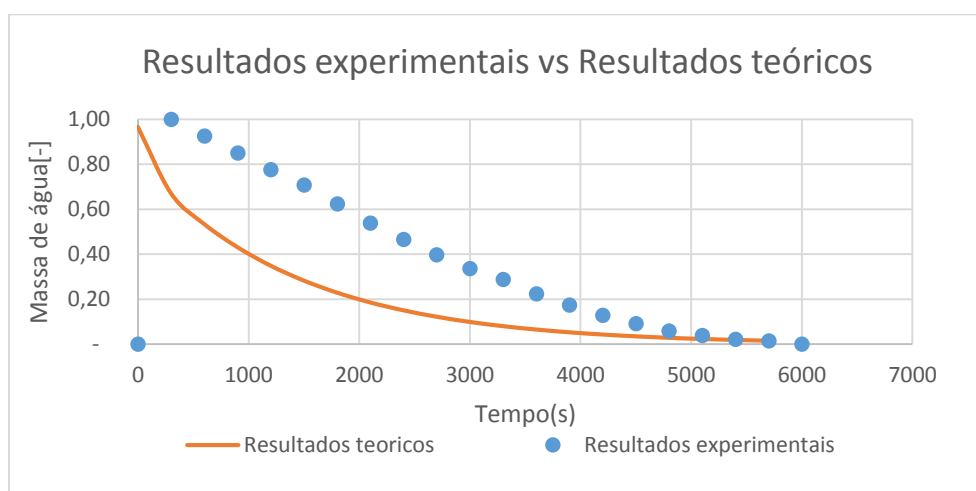


Figura F.2 1 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel Branco (50°C-40%-1,5m/s)

## F.3 Resultados experimentais vs resultados teóricos (4º Papel Branco)

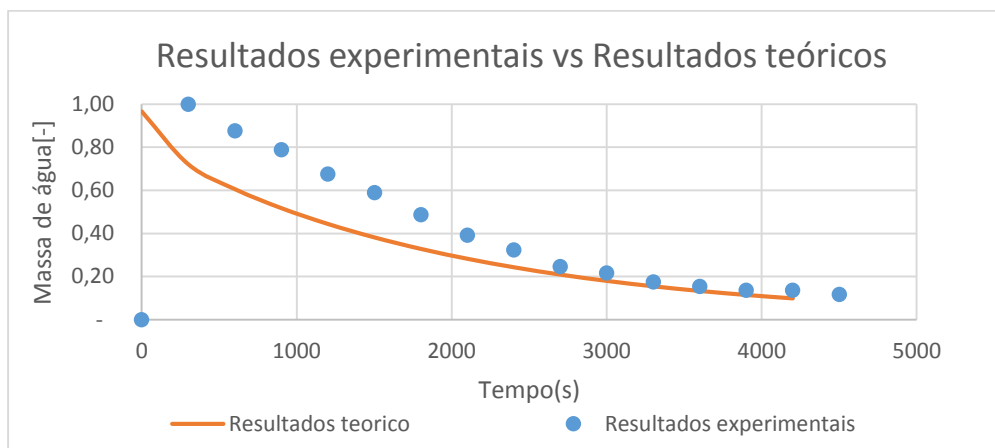


Figura F.3 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel Branco (40°C-40%-2,5m/s)



## F.4 Resultados experimentais vs resultados teóricos (5º Papel Branco)

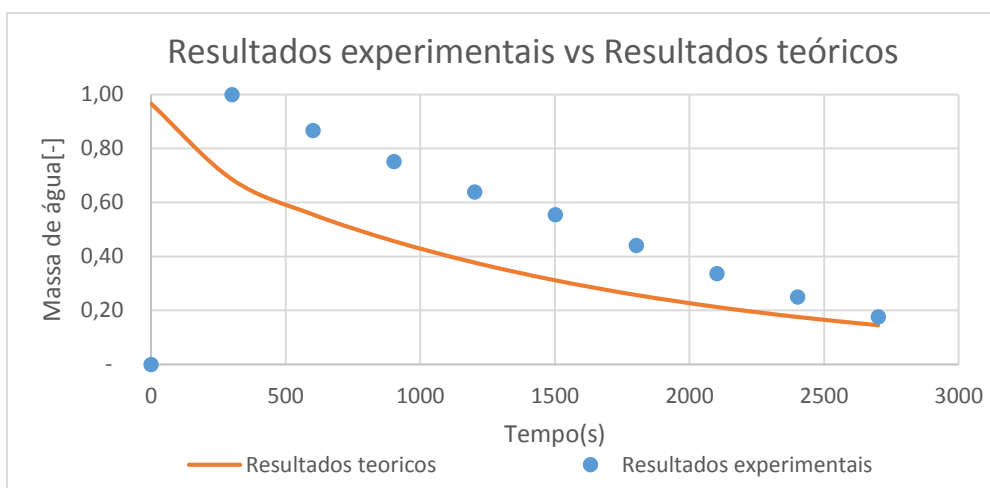


Figura F.4 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel Branco (50°C-50%-2,5m/s)

## F.5 Resultados experimentais vs resultados teóricos (2º Papel de cor espesso)

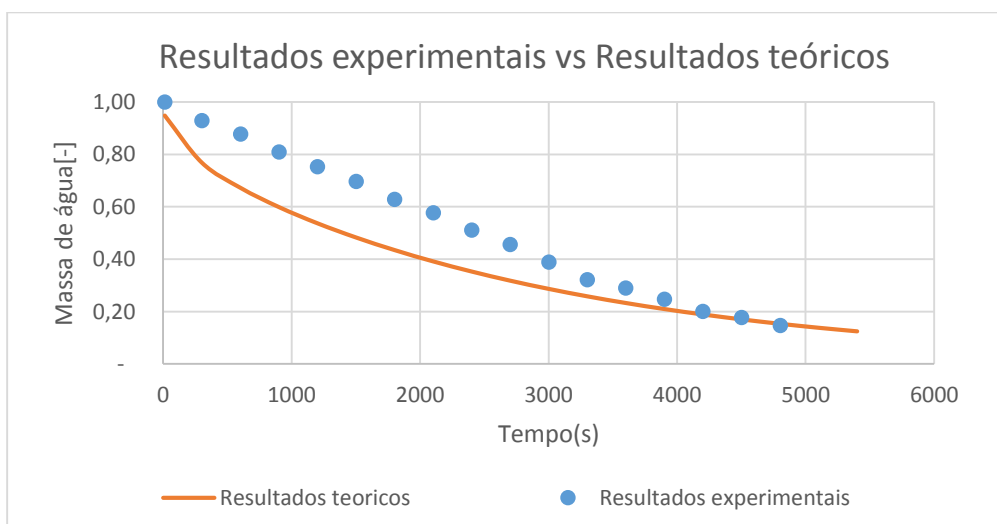


Figura F.5 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (40°C-50%-1,5m/s)

## F.6 Resultados experimentais vs resultados teóricos (3º Papel de cor espesso)

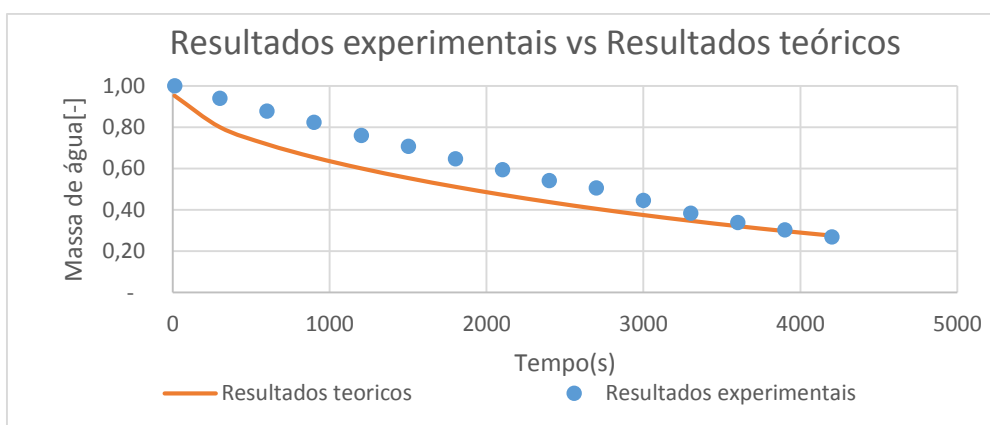


Figura F.6 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (50°C-50%-1,5m/s)



## F.7 Resultados experimentais vs resultados teóricos (2º Papel de cor fino)

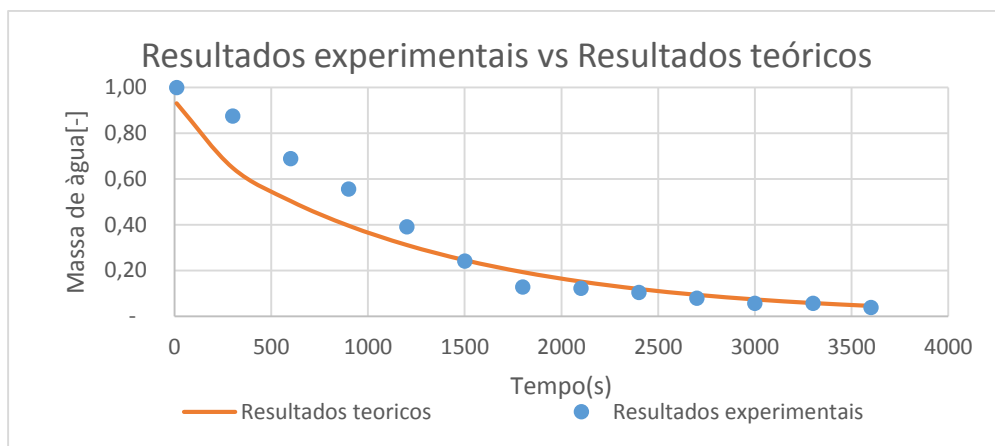


Figura F.7 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (50°C-40%-1,5m/s)

## F.8 Resultados experimentais vs resultados teóricos (3º Papel de cor fino)

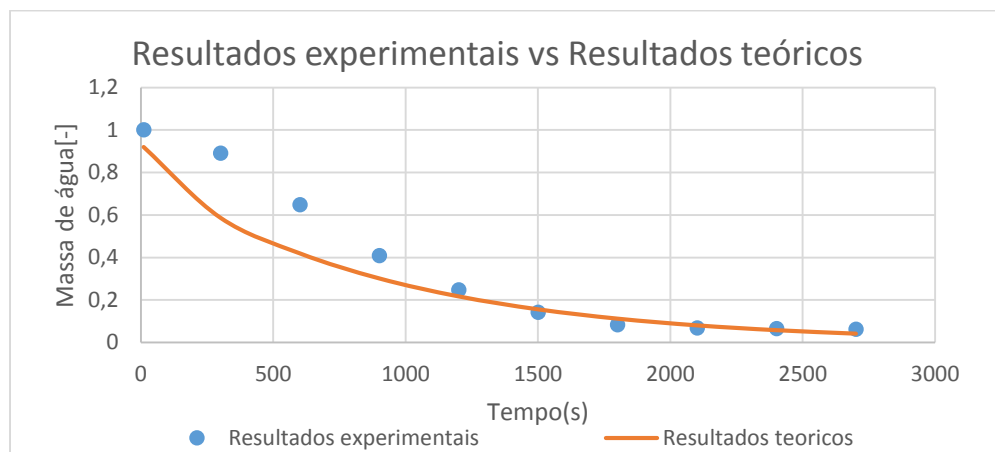


Figura F.8 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (50°C-50%-1,5m/s)

## F.8 Resultados experimentais vs resultados teóricos (3º Papel de cor fino)

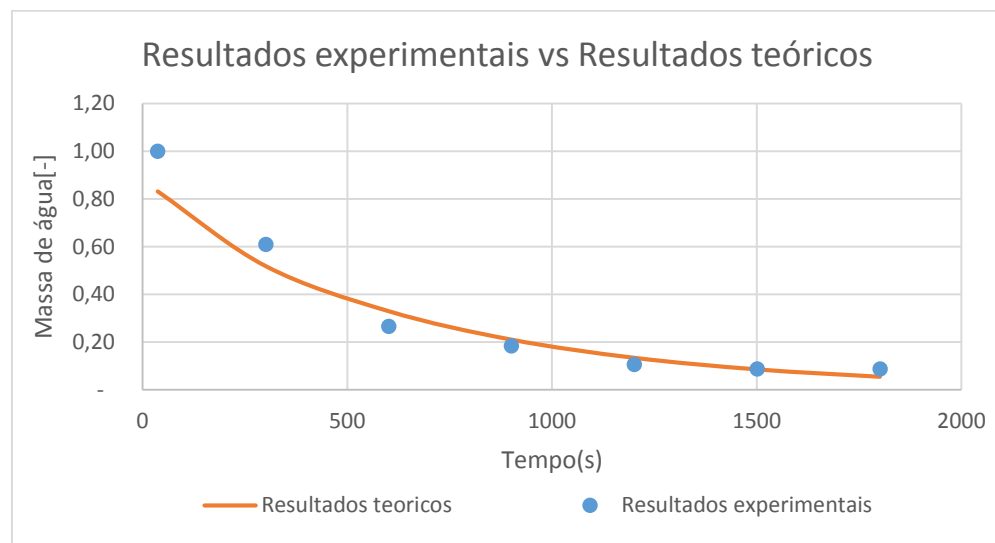


Figura F.9 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (60°C-30%-1,5m/s)

F.10 Resultados experimentais vs resultados teóricos (5º Papel de cor fino)

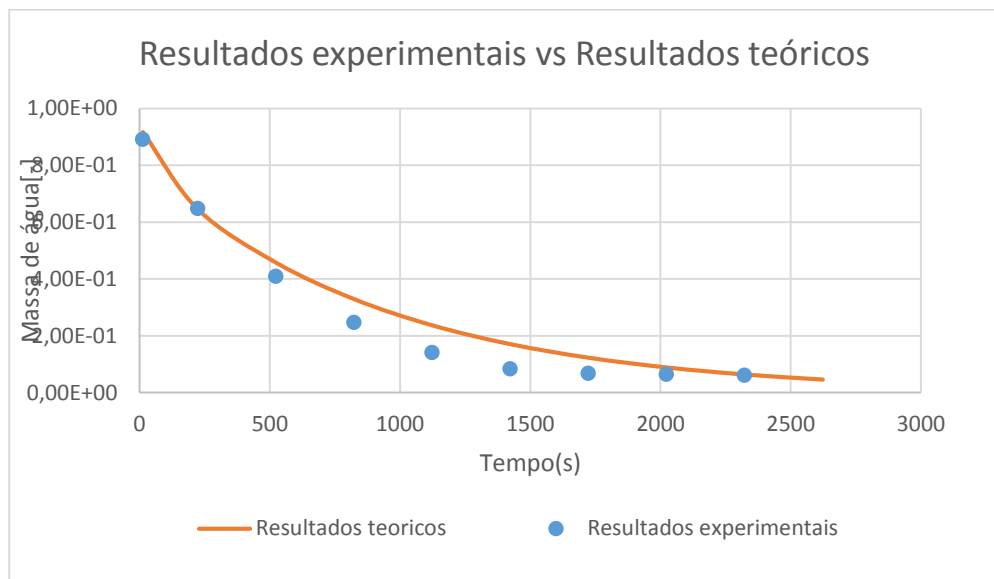


Figura F.10 Resultados experimentais vs resultados teóricos, Papel de cor fino (50°C-50%-2,5m/s)